

Wzmacnianie podtorza kolejowego metodą stabilizacji ubocznymi produktami spalania

Waldemar Cyske

Uboczne produkty spalania powstają na skutek spalania w piecach bezresztowych różnych rodzajów węgla. Popioły odprowadzane spod elektrofiltrów w postaci suchego pyłu posiadają właściwości wiążące i mogą być stosowane jako samodzielne spoiwo lub jako dodatek do innych spoiw. Każdorazowo przed przystąpieniem do stabilizacji gruntu spoiwem hydraulicznym należy sporządzić receptę laboratoryjną. Najważniejszym parametrem dla wykonanego podtorza jest jego nośność określana za pomocą metody statycznych obciążeń płytowych, popularnie VSS. W metodzie tej wyznacza się pierwotny oraz wtórny moduł odkształcenia podtorza.

** artykuł jest zmodyfikowaną wersją referatu wygłoszonego na V. Konferencji Naukowo-Technicznej "Problemy modernizacji i budowy podtorza kolejowego" Wrocław - Szklarska Poręba, 14-15 października 2010 r.*

Uboczne produkty spalania

Uboczne produkty spalania (UPS) powstają na skutek spalania w piecach bezresztowych różnych rodzajów węgla.

Uboczne produkty spalania mogą mieć postać:

- popiołów lotnych,
- żużli paleniskowych, popiołów dennych.

W zależności od rodzaju spalanego węgla normy, zarówno z lat 1960-80, jak i obecnie obowiązujące normy PN-EN wyróżniają dwie grupy popiołów lotnych. Są to popioły:

- krzemianowe – o właściwościach pucolanowych,
- wapienne (wapniowe) – o właściwościach hydraulicznych.

Normy te nie uwzględniają popiołów odbieranych hydraulicznie, które na skutek kontaktu z wodą utraciły swoje właściwości wiążące.

Popioły lotne jako spoiwo

Popioły odprowadzane spod elektrofiltrów w postaci suchego pyłu posiadają właściwości wiążące i mogą być stosowane jako samodzielne spoiwo lub jako dodatek do innych spoiw. Jest to związane z obecnością w popiołach aktywnych związków chemicznych, podobnych jakie występują w cementach. Co ciekawe popioły lotne mają podobny skład chemiczny jak popioły wulkaniczne, stosowane przez Rzymian do budowy dróg już w starożytności.

Prace nad zastosowaniem popiołów lotnych jako samodzielnego spoiwa drogowego prowadził Profesor Jan Pachowski już w latach 1960-tych [1]. Jego doświadczenia opublikowane w książce „Popioły lotne i ich zastosowanie w budownictwie drogowym”, do dzisiaj stanowią biblię w tej dziedzinie wiedzy inżynierskiej i normach [3, 4].

Należy pamiętać, że popioły lotne mają inną charakterystykę wiązania i nie dają takich dużych wytrzymałości jak cementy, jednak mają wiele innych zalet:

- Małe wytrzymałości skutkują małym skurczem hydratacyjnym i termicznym.
- Możliwość stosowania do stabilizacji gruntów spoiw.
- Możliwość stabilizacji gruntów przewilgotnionych.
- Możliwość stabilizacji niektórych gruntów organicznych.
- Podwyższenie wilgotności optymalnej gruntu.
- Dodatek popiołu lotnego powoduje zmianę struktury gruntu, wzrost jego sztywności i w konsekwencji nośności.
- Nie ma konieczności składowania UPS.
- Oszczędność nowych materiałów budowlanych. Szczególnie korzystna jest możliwość stabilizacji gruntów spoiw oraz częściowo gruntów organicznych. W podłożach wszelkich budowli liniowych zalegają zazwyczaj różnorodne grunty.

Norma PN-EN 14227-4 [2] podaje właściwości jakie powinny spełniać popioły lotne. Podano je w tabeli 1.

Stabilizacja spoiwem hydraulicznym

Stabilizacja spoiwem hydraulicznym jest to proces technologiczny polegający na wymieszaniu gruntu ze spoiwem w obecności wody i niekiedy innych dodatków, mający na celu:

- osuszenie gruntu podłoża,
- podniesienie jego wilgotności optymalnej,
- doziarnienie gruntu,
- ułatwienie zagęszczenia gruntu,
- zmianę struktury gruntu,
- zwiększenie odporności na wpływ wody i mrozu,
- niekiedy uzyskanie wytrzymałości na ściskanie.

Tab. 1. Właściwości popiołów lotnych

Lp.	Właściwości	Wymagania	Metody badania
Krzemianowe popioły lotne			
1	Uziarnienie (przechodzi przez sito #): • 0,090 mm • 0,045 mm	≥70% ≥40%	EN 451-2
2	Straty prażenia	≤10%	EN 196-2
3	Zawartość SO ₃	≤4%	EN 196-2
4	Stołość objętości, dla mieszanki 30% popiołów i 70% cementu wzorcowego (jeżeli wolny CaO ≥1%)	≤10 mm	PN-EN 196-3:2006
5	Zawartość wody	≤1%	
Wapniowe popioły lotne			
1	Uziarnienie (przechodzi przez sito #): • 0,315 mm • 0,090 mm	≥95% ≥70%	PN-EN 196-6 paragraf 3
2	Stołość objętości, dla mieszanki 30% popiołów i 70% cementu wzorcowego	≤10 mm	PN-EN 196-3:2006
3	Reaktywność tlenku wapnia	≥5%	PN-EN 197-1
4	Zawartość wody	≤1%	

Złożenie tych czynników powoduje niekiedy kilkakrotny wzrost nośności w stosunku do właściwości pierwotnych. W stabilizacji gruntów istnieje zasada: „im gorzej tym lepiej”, którą należy rozumieć w ten sposób, że jeżeli mamy do czynienia z bardzo słabym gruntem, który jest jeszcze dodatkowo nawodniony to dodatek popiołów lotnych spowoduje kilkakrotny wzrost nośności. Jeżeli natomiast mamy do czynienia z gruntem o średniej nośności, np. piaski gliniaste, to popioły lotne spowodują osuszenie podłoża, umożliwią jego zagęszczenie, a wzrost nośności może być niewielki.

Samo umożliwienie właściwego zagęszczenia gruntu poprzez zmianę wilgotności naturalnej oraz wzrost wilgotności optymalnej daje niekiedy kilkakrotny wzrost nośności podłoża.

Dodatkowo niektóre spoiwa, o grubszym uziarnieniu, dodawane do gruntów bardzo drobnych, takich jak pyły i ropy mogą powodować ich doziarnienie, co ułatwia zagęszczenie i wielokierunkowo wpływa na nośność podłoża: poprzez lepsze uziarnienie, lepsze zagęszczenie i związanie struktury.

Kolejną zaletą stabilizacji za pomocą UPS jest chemiczna zmiana struktury gruntu i związanie jego cząstek. Powoduje to uzyskanie sztywnej platformy roboczej, stanowiącej fundament dla konstrukcji nawierzchni lub nasypu. Grunty spoiwne po stabilizacji spoiwem hydraulicznym nie uzyskują dużych wytrzymałości, co jest w wielu przypadkach zaletą, ponieważ nie powstaje efekt „szyby ułożonej na plastycznym podłożu”. Uzyskiwane wytrzymałości są zazwyczaj rzędu 1 MPa, co pozwala płynnie przejść z plastycznego podłoża do sztywnych warstw konstrukcji nawierzchni.

wana jest niekiedy w przypadku występowania w podłożu piasków jednofrakcyjnych. Piaski takie mają prawie wszystkie ziarenka o podobnej wielkości. W związku z tym nie zachodzi w nich zjawisko klinowania i wypełniania wolnych przestrzeni pomiędzy większymi ziarnami poprzez ziarna mniejsze. Dodatkowo, jeżeli piaski takie są pochodzenia rzeczno-ich ziarenka mają kształt zbliżony do kul i w czasie zagęszczania zachowują się jak łożysko. W takiej sytuacji ich zagęszczenie klasycznymi metodami staje się praktycznie niemożliwe. Dodatek spoiwa hydraulicznego, o drobnym uziarnieniu, pełni w takiej sytuacji rolę głównie wypełniacza, do ziarnienia drobną frakcją, co pozwala zagęścić grunty w normalnych warunkach niezagęszczane, a dodatkowo w niewielkim stopniu spoiwo to wiąże ziarna piasku, tworząc w miarę sztywną platformę roboczą.

Projektowanie stabilizacji

Każdorazowo przed przystąpieniem do stabilizacji gruntu spoiwem hydraulicznym należy sporządzić receptę laboratoryjną. Ponieważ praktycznie zawsze w przypadku stabilizacji wykonywanej metoda in situ warunki występujące w podłożu podlegają zmianom zarówno w miejscu jak i w czasie, recepta taka musi być na bieżąco korygowana. Nie ma potrzeby wykonywania kilku recept w tak zmiennych warunkach gruntowych, wodnych i pogodowych. Korekty jest w stanie wprowadzać doświadczona kadra prowadząca roboty.

Projektowanie mieszanki gruntu stabilizowanego spoiwem podłoża polega na:

- określeniu wilgotności naturalnej gruntu,
- wstępnym doborze ilości spoiwa,

Ponieważ podstawowym celem stabilizacji UPS jest osuszenie gruntu i zwiększenie nośności podłoża, rzadko określa się wytrzymałość na ścislenie powstałej mieszanki. Zresztą to nie tylko wytrzymałość na ścislenie jest podstawą wzrostu nośności podłoża.

Ze względów konstrukcyjnych dużo większe znaczenie ma grubość wykonywanej stabilizacji niż jej wytrzymałość. Dlatego w terenie oraz w czasie projektowania należy wziąć pod uwagę oryginalną nośność podłoża i cel jaki mamy osiągnąć – nośność ulepszonego podtorza. Aby to sprawdzić lub zweryfikować założenia projektowe wykonuje się odcinki doświadczalne z różną zawartością spoiwa (zależną od wilgotności gruntu podłoża), a także z różną głębokością mieszania gruntu ze spoiwem.

W przypadku słabych podłoży zaleca się, aby:

- Minimalna głębokość mieszania wynosiła 30 cm – wynika to z faktu konieczności wprowadzenia maszyn budowlanych do wykonywania następnych warstw podtorza i nawierzchni.

- Maksymalna głębokość mieszania wynosiła 50 cm – wynika to z przyczyn technicznych i konstrukcyjnych. Maszyny do mieszania in situ są w stanie w jednym przejściu wymieszać grunt ze spoiwem właśnie na taką głębokość. Głębsze mieszanie może także zakłócić pracę sąsiednich torów.

Głębsze mieszanie jest jednak możliwe, ale wymaga przeprowadzenia tego procesu w kilku stopniach, a także wprowadza pewne ograniczenia organizacyjne – rozebranie kilku torów jednocześnie.

Wymagania dla podtorza kolejowego

Podtorze – kolejowa budowla ziemna wraz z urządzeniami ją zabezpieczającymi, ochraniającymi i odwadniającymi, podlegająca oddziaływaniom eksploatacyjnym, wpływom klimatycznym oraz wpływom podłoża gruntowego zalegającego bezpośrednio pod podtorzem i w najbliższym jego otoczeniu (Id-3 Warunki Techniczne utrzymania podtorza kolejowego).

Podtorze powinno:

- być dostatecznie wytrzymałe i trwałe oraz stanowić stateczną i jednorodną podstawę dla nawierzchni kolejowej linii o określonych parametrach eksploatacyjnych,
- w występujących warunkach klimatycznych i eksploatacyjnych nie ulegać nadmiernym trwałym i sprężystym odkształceniom, zagrażającym bezpieczeństwu ruchu, bądź też stwarzającym potrzebę zbyt częstych napraw nawierzchni.

Zgodnie z Id-3 podtorze powinno spełniać następujące wymagania:

Tab. 2. Zalecane właściwości gruntów spoistych do stabilizacji popiołami lotnymi [3]

Lp.	Właściwości	Wymagania	Metody badania
1	Uziarnienie, przechodzi przez sito # 0,002 mm	≤20%	PN-B-04481:1988
2	Granica płynności	≤40%	PN-B-04481:1988
3	Wskaźnik plastyczności	3 ÷ 20%	PN-B-04481:1988
4	Zawartość części organicznych	≤5%	PN-B-04481:1988
5	Zawartość siarki, w przeliczeniu na SO3	≤1%	PN-EN 1744-1:2000

Grunty do stabilizacji

Zazwyczaj przyjmuje się, że do stabilizacji spoiwem hydraulicznym nadają się grunty spoiste o właściwościach podanych w tabeli 2. Analizując właściwości gruntów przydatnych do stabilizacji spoiwami popiołowymi można zauważyć, że stabilizowane mogą być wszystkie grunty spoiste poza glinami związłymi i iltami. Jednak należy pamiętać, że decydującym kryterium przydatności gruntu do stabilizacji są badania nośności przeprowadzone w terenie.

Stabilizacja spoiwem hydraulicznym stosowa-

- określeniu wilgotności optymalnej mieszanki gruntu i spoiwa,
- określeniu właściwości gruntu stabilizowanego spoiwem,
- porównaniu wyników badań z założeniami projektowymi.

Recepta laboratoryjna powinna zawierać:

- rodzaj gruntu do stabilizacji,
- wilgotność naturalną gruntu,
- rodzaj i zawartość spoiwa,
- zawartość ewentualnych dodatków,
- wilgotność optymalną mieszanki i ewentualny potrzebny dodatek wody,
- projektowane właściwości mieszanki.

- dla podtorza linii nowobudowanych i modernizowanych 80 ÷ 120 MPa,
- dla podtorza linii eksploatowanych (przy ocenie potrzeby wzmocnienia) 40 ÷ 80 MPa.

Trwałość górnej części podtorza zapewnia się przez zastosowanie materiałów:

1. Dostatecznie trwałych, tj. odpornych na wodę, nieorganicznych (lom $\leq 0,2\%$), o zawartości $SO_3 \leq 0,2\%$.
2. Dobrze uziarnionych i nie ulegających rozgęszczeniu pod wpływem drgań.
3. Niewysadzinowych.
4. Stabilnych mechanicznie na styku warstw (nie mieszających się). Nie wymaga się w przypadku gruntów stabilizowanych.
5. Odpowiednio wodoprzepuszczalnych:
 - $\geq 10-4$ m/s gdy grunt musi przepuszczać wody opadowe,
 - $< 10-6$ m/s gdy konieczne jest zapobieżenie infiltracji wody opadowej (należy wtedy odpowiednio wyprofilować podtorze).

W podtorzu stosuje się także warstwy ochronne. Ich grubość w zależności od rodzaju gruntu podłoża powinna wynosić od 30 do 50 cm. Do ich wykonania dopuszcza się wykonanie stabilizacji gruntu spoiwami. Dużą wagę przykładana się do jednorodności podtorza na całych szlakach i grupach stacyjnych.

Cała nawierzchnia kolejowa i podtorze powinny zapewniać mrozoodporność konstrukcji. Łączna grubość wszystkich warstw powinna wynosić od 54 do 132 cm, w zależności od rejonu Polski.

Przykład stabilizacji podtorza LCS Tczew, szlak E-65, tor nr 1, km 287+720 ÷ 292+700

Minimalna temperatura powietrza w czasie prowadzenia robót powinna być wyższa od 0°C. Wynika to z faktu zachodzenia reakcji wiązania hydratów z wodą.

Na przykładowym odcinku roboty prowadzone były w październiku i listopadzie 2009. Zaleca się sprawdzenie prognozy pogody na najbliższe kilka dni. Zabrania się układania mieszanki w czasie intensywnych opadów atmosferycznych. Nie dopuszcza się prowadzenia robót na zamrożonym podłożu.

Na omawianym odcinku występowały gliny i gliny zwięzłe o dużej wilgotności. Pokazują to zdjęcia. Pomimo iż omawiany odcinek znajdował się na starym nasypie to jednak grunt przewilgocony był na znacznej głębokości, a nie tylko powierzchniowo. Jest to charakterystyczne dla takich rejonów jak Żuławy.

Na odcinku próbnym wykonano następujące sekcje mające pozwolić dobrać odpowiedni sposób wykonania całego zadania:



1. Widok gruntu przed stabilizacją



2. Widok gruntu przed stabilizacją



3. Załadunek spoiwa do rozsypywacza



4. Rozkładanie spoiwa Tefra 15

- Mieszanie na głębokość 30 i 45 cm.
- Dodatek spoiwa w ilości 5, 7 i 9%. Przy takim założeniu wykonano 6 sekcji odcinka próbnego.

Ze względu na dużą głębokość miękkoplastycznych gruntów spoistych, aby uzyskać zadowalającą nośność podłoża przyjęto głębokość mieszania 45 cm. Mniejsza nie dawała właściwych rezultatów. Za właściwą przyjęto najwyższą zawartość spoiwa – 9%, którą niekiedy w przypadkach szczególnych jeszcze zwiększano. Dla głębokości mieszania 45 cm i wymaganej zawartości spoiwa 9% obliczono potrzebną ilość spoiwa w przeliczeniu na 1 metr kwadratowy powierzchni – 77 kg.

Rozkładanie spoiwa odbywa się w klasyczny sposób jak dla wszystkich innych spoiw w postaci sypkiej. Przedstawiają to zdjęcia 3 i 4. Jedyna różnica występuje w przypadku potrzeby dużego dodatku spoiwa, kiedy rozsypany musi rozkładać spoiwo dwukrotnie, ze względu na ograniczenia techniczne. Schemat mieszania przedstawiono na rysunku 5.

Kolejną operacją technologiczną jest wstępne zagęszczenie wykonanej stabilizacji. Wykonuje się to za pomocą klasycznego sprzętu do zagęszczania gruntów. W przypadku występujących w podłożu spoistych gruntów plastycznych należy uważać ze stosowaniem walców wibracyjnych. Ciężki sprzęt mieszający pozostawia po sobie niekiedy koleiny dochodzące do 30 cm (fotografia 9). Uniemożliwia to właściwe zagęszczenie całej powierzchni i po wstępnym jej zagęszczeniu zawsze potrzebne jest wyrównanie całej powierzchni, nadanie jej właściwych spadków i wtedy ostateczne zagęszczenie (fotografie 10 i 11).

W warunkach jesiennych grunty spoiste stabilizowane spoiwem Tefra 15 nie wymagają żadnej pielęgnacji. Jest ona potrzebna tylko w przypadku ulepszania gruntów niespoistych z czasie upalnego lata.

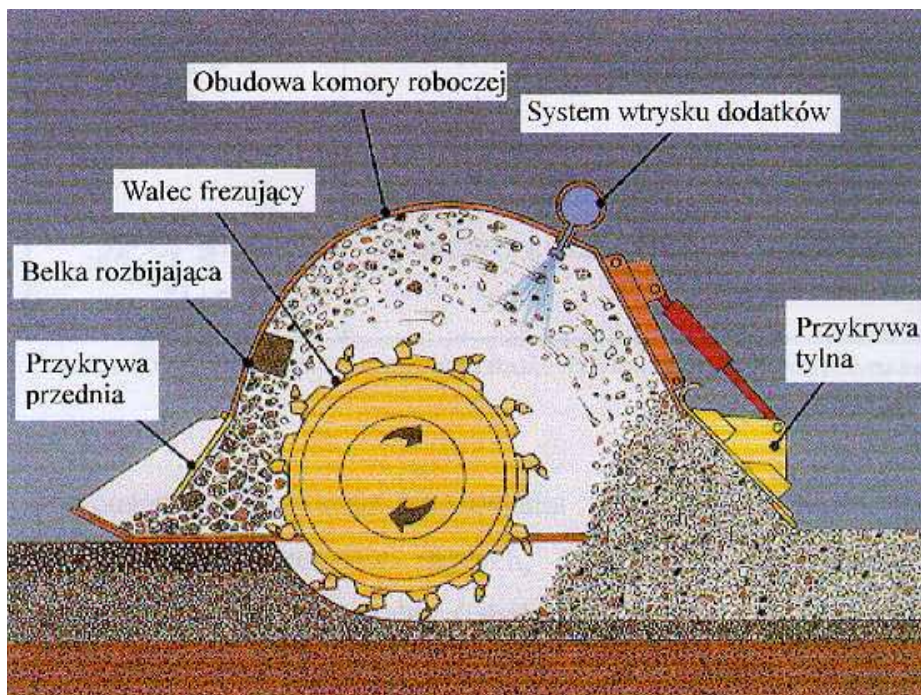
Ocena wyników badań

Badania podtorza wykonywane były przez niezależne laboratorium DRO-LAB prowadzone przez dr inż. Henryka Kobę.

Najważniejszym parametrem dla wykonanego podłoża jest oczywiście jego nośność określana za pomocą metody statycznych obciążeń płytowych, popularnie VSS. W metodzie tej wyznacza się pierwotny oraz wtórny moduł odkształcenia podtorza. Badanie to wykonywano co 50 mb toru.

Po przeanalizowaniu wszystkich wyników wykonanych badań okazało się, że:

- Pierwotny moduł odkształcenia podtorza wynosił od 5 do 45 MPa, jednak najczęściej był w granicach od 10 do 25 MPa.
- Wtórny moduł odkształcenia wynosił od 6 do 48 MPa.



5. Schemat mieszania gruntu ze spoiwem



6. Widok sprzętu mieszającego



7. Widok mieszalnika w czasie pracy

Świadczy to zdecydowanie o niespełnieniu wymagań postawionych w Dokumentacji Kontraktowej, gdzie podtorze powinno mieć nośność 45 MPa.

Po wykonaniu zabiegu stabilizacji spoiwem Tefra 15 nośność podłoża wynosiła odpowiednio:

- Pierwotny moduł odkształcenia podtorza wynosił od 39,5 do 140 MPa, jednak najczęściej był w granicach od 60 do 90 MPa.
- Wtórny moduł odkształcenia wynosił od 56 do 173 MPa. We wszystkich badanych punktach spełnione zostało założenie projektowe.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Pachowski J.: Popioły lotne i ich zastosowanie w budownictwie drogowym. WKŁ 1976
- [2] PN-EN 14227-4:2003 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Popiół lotny do mieszanek stabilizowanych hydraulicznie.
- [3] BN-71/8933-10 Drogi samochodowe. Podbudowa z gruntów stabilizowanych aktywnymi popiołami lotnymi
- [4] PN-S-06103:1997 Drogi samochodowe. Podbudowa z betonu popiołowego
- [5] PN-S-96012:1997 Drogi samochodowe. Podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem
- [6] Zestawienie badań geologicznych. Odcinek Szymankowo – Lisewo. Tor nr 1, km 287+720 ÷ 292+700. DRO-LAB. Jelcz-Laskowice 2009.



8. Remixer w czasie pracy



9. Widok gruntu po wymieszaniu ze spoiwem



10. Zagęszczanie wykonanej warstwy podłoża



11. Profilowanie wykonanej warstwy podłoża

dr inż. Waldemar Cyske
Politechnika Gdańska