

NAWIERZCHNIA KOLEJOWA Z WARSTWAMI ASFALTOWOWYMI

Dariusz Sybilski

prof. zw. dr hab. inż., Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Politechnika Lubelska

Streszczenie. W artykule opisano nawierzchnie kolejowe, w których zastosowano warstwy z mieszanek mineralno-asfaltowych. Rozwiązanie to, znane w wielu krajach, zwiększa trwałość i nośność torowiska kolejowego. Przedstawiono rys historyczny stosowania warstwy asfaltowej w nawierzchni oraz rozwój tej technologii w wybranych krajach. Na podstawie wyników prac badawczych, przeprowadzonych w laboratoriach i na eksploatowanych liniach kolejowych, wykazano zalety warstwy asfaltowej w konstrukcji dróg kolejowych.

Słowa kluczowe: *nawierzchnia kolejowa, Koleje Dużych Prędkości*

1. Wprowadzenie

Według Dyrektywy Unii Europejskiej nr 96/48 z 1996 r., minimalna prędkość na kolejach dużych prędkości jest równa 250 km/h. Obecnie w 11 krajach świata szybka kolej osiąga prędkość do 300 km/h, a w niektórych prędkość do 350 km/h. Największą prędkość, ponad 410 km/h, osiąga obecnie pasażerski pociąg magnetyczny w Szanghaju (Chiny).

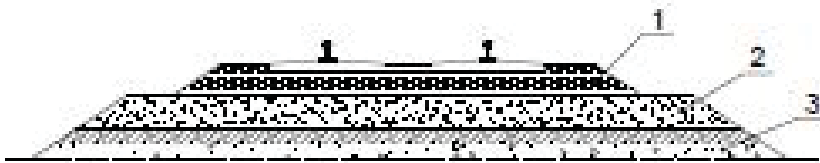
Prognozy wskazują, że w niedługim czasie łączna długość linii kolejowych dużych prędkości na świecie, będzie wynosiła 24 tys. km, a maksymalna prędkość w Japonii wyniesie 370 km/h. Prognozuję się, że w ciągu roku łączna liczba pasażerów osiągnie 1 miliard [11].

W Polsce trwają przygotowania do budowy Kolei Dużych Prędkości (KDP). Dyskusje prowadzone w środowisku specjalistów oraz w mediach, dotyczą przede wszystkim odpowiedniego taboru kolejowego, przebiegu linii kolejowych, terminu rozpoczęcia i zakończenia budowy oraz finansowania. Autor nie jest specjalistą w tej dziedzinie. Jego polem działania są nawierzchnie drogowe, a zwłaszcza asfaltowe. W artykule przedstawiono szczególne zagadnienie, nie poruszane w dyskusjach medialnych, a istotne dla trwałości budowanych linii kolejowych – zastosowania warstw asfaltowych w konstrukcji drogi kolejowej.

2. Podtorze kolejowe i wymagania

Konwencjonalna, typowa nawierzchnia kolejowa (szyny wraz z podkładami i podsypką) zazwyczaj jest układana na podtorzu wykonanym z materiałów niezwiązanych, tj. z gruntów i kruszyw mineralnych (rys. 1). Do budowy podtorza mogą być stosowane także odpady i materiały z recyklingu (odsiewki, kamień dołowy, żużle wielkopieczowe, popioły lotne i paleniskowe oraz gruz) [9].

Podtorze kolejowe przejmuje statyczne i dynamiczne obciążenia taborem kolejowym oraz siły od ciężaru własnego nawierzchni i podtorza. Podtorze powinno zapewnić także odwodnienie nawierzchni kolejowej.

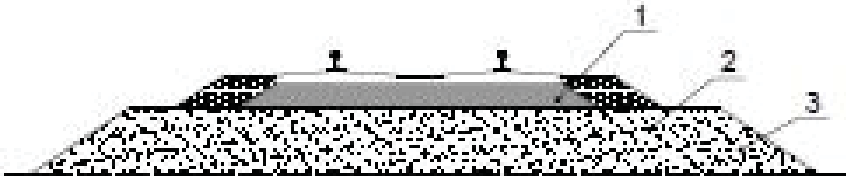


Rys. 1. Schemat typowej konstrukcji nawierzchni i podtorza kolejowego:
1) podsypka tłuczniowa, 2) podtorze, 3) podłoże gruntowe

Uszkodzenia podtorza są powodowane powtarzalnym obciążeniem dynamicznym przekazywanym przez podkłady na podsypkę i podtorze. W efekcie występują nieregularne odkształcenia torowiska i eksploatowanego toru. Powszechnie stosowana podsypka i wzmocnienie górnej części podtorza warstwą kruszywa mineralnego, nie chronią przed takimi odkształceniami. Zastosowanie w tych warstwach nawet bardzo dobrych materiałów – kruszyw o dobrym, przyzmatoidalnym kształcie ziaren, dobrze zagęszczonych i zapewniających odpowiednią nośność – nie gwarantuje stabilności nawierzchni poddawanej długotrwałym cyklicznym obciążeniami [5].

3. Początki stosowania warstwy asfaltowej w nawierzchni kolejowej

Próby stosowania warstwy asfaltowej w nawierzchni kolejowej rozpoczęto w USA w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Inicjatorem badań był Instytut Asfaltowy [3]. Początkowo zaproponowano konstrukcję z pełną warstwą asfaltową, całkowicie zastępującą warstwę podsypki z kruszywa (ang. *full depth* lub *overlayment*), rys. 2. Później wprowadzono wariant konstrukcji nawierzchni kolejowej z dolną warstwą asfaltową przykrytą górną warstwą podsypki z kruszywa (ang. *underlayment*), rys. 3.



Rys. 2. Schemat konstrukcji nawierzchni z pełną warstwą asfaltową:
1) podsypka tłuczniowa, 2) warstwa asfaltowa, 3) podłoże gruntowe

Wybudowana w 1964 r. pierwsza linia kolejowa Kolei Dużych Prędkości, Tokaido Shinkansen (Japonia), także miała warstwę asfaltową, o grubości 5 cm, położoną na warstwie z kruszywa mineralnego o grubości od 15 do 60 cm, stabilizowanego mechanicznie (rys. 4). Głównym celem zastosowania tej warstwy była ochrona podłoża gruntowego przed wodą oraz zwiększenie sztywności podtorza.

W 1969 r. w Raton (USA, stan Nowy Meksyk) przeprowadzono pierwszą próbę wykonania nawierzchni kolejowej z warstwą asfaltową. Zbudowano trzy odcinki testowe o długości 214 m każdy. Grubości warstwy asfaltowej wynosiły odpowiednio 63 mm, 127 mm, 190 mm. Warstwa asfaltowa była pokryta warstwą podsypki tłuczniowej o szerokości 4,88 m i grubości 254 mm. Nawierzchnie te obserwowane w długim okresie użytkowania nie wykazały żadnych uszkodzeń. Badania próbek mieszanek mineralno-asfaltowych i odzyskanego asfaltu pobranych w 1983 i 1998 r. (po 14 i po 29 latach), wykazały znikome zmiany właściwości, co świadczy o minimalnym starzeniu asfaltu w długim okresie eksploatacji.

Warstwa asfaltowa w nawierzchni kolejowej ułożona pod warstwą podsypki tłuczniowej jest w mniejszym stopniu poddana oddziaływaniu warunków atmosferycznych (temperatura, deszcze, śnieg). Warunki te są istotnie różne od warunków w asfaltowej nawierzchni drogowej, w której zwłaszcza warstwa ścieralna jest poddana bezpośredniemu oddziaływaniu warunków atmosferycznych, powodujących starzenie asfaltu i w jego efekcie twardnienie. Po długoletniej eksploatacji starzenie asfaltu może prowadzić do spękań powierzchniowych nawierzchni. Jak wykazały wspomniane badania w USA, w nawierzchni kolejowej takie zjawisko nie występuje.

W USA przeprowadzono obszerne prace badawcze nad zastosowaniem warstwy asfaltowej w nawierzchni kolejowej. Głównym ośrodkiem naukowym zajmującym się tym zagadnieniem jest Uniwersytet Kentucky, Lexington (zespołem badawczym od lat kieruje profesor Jerry Rose).

W 1984 r. opracowano program komputerowy Kentrack do analizy metodą elementów skończonych konstrukcji podtorza kolejowego wraz z nawierzchnią jako układu warstw sprężystych [4]. Program pozwala na analizę klasycznej nawierzchni z podsypką niezwiązaną lub nawierzchni z warstwami asfaltowymi. Najnowsza wersja programu pochodzi z 2004 roku.

4. Zalety warstwy asfaltowej

Zastosowanie warstwy asfaltowej w nawierzchni kolejowej upowszechniło się z dwóch głównych powodów [6]:

- zwiększenie obciążenia kolei i wzrost natężenia ruchu (USA),
- budowa Kolei Dużych Prędkości (Włochy, Niemcy, Francja, Japonia).

W obecnych konstrukcjach toru stosuje się dwa następujące rozwiązania:

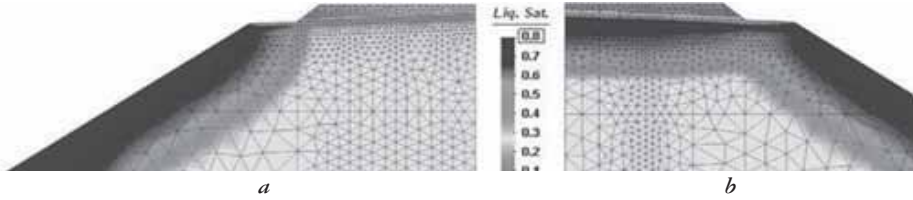
- warstwa asfaltowa w górnej części podtorza, bezpośrednio pod podsypką,
- warstwy asfaltowe stanowiące podbudowę konstrukcji nawierzchni bezpodsypkowej.

Zastosowanie warstwy asfaltowej w nawierzchni kolejowej zapewnia zwiększenie nośności podtorza kolejowego. Zwiększa się jego stabilność i trwałość. Efektem jest zmniejszenie częstości zabiegów utrzymaniowych nawierzchni i podtorza. Warstwa asfaltowa nawierzchni pozwala także na zmniejszenie grubości konstrukcji nawierzchni. Jest to ważne zwłaszcza w przypadku tuneli i mostów. Funkcje warstwy asfaltowej w nawierzchni i podtorzu kolejowym są następujące [1]:

- stworzenie platformy roboczej, na której mogą być sprawnie wykonane instalacje elektryczne,
- przeniesienie obciążeń od taboru,
- zabezpieczenie gruntów przed infiltracją wód opadowych i sezonowymi zmianami temperatury (cykle przemarzania i odmarzania gruntów),
- ochrona górnej, tłuczniowej warstwy podsypki przed przenikaniem drobnych cząstek zanieczyszczeń z nasypu lub podłoża gruntowego,
- równomierny rozkład obciążenia (ciśnienia) na podłoże gruntowe i wyeliminowanie lokalnych uszkodzeń podłoża.

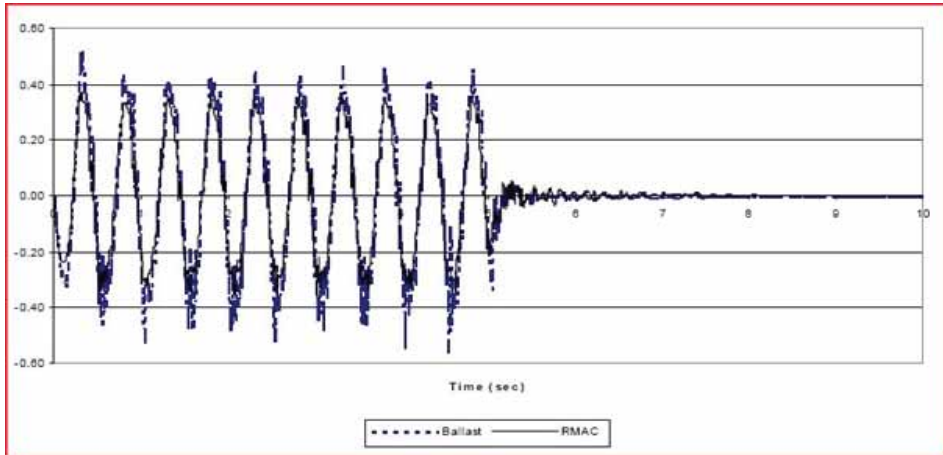
Warstwa asfaltowa wbudowana na styku nawierzchni i podtorza, zapewnia równomierny rozkład sił działających na grunty i jest poddawana wyłącznie ścisłaniu, co sprawia że nie ulega zmęczeniu (brak spękań zmęczeniowych w przeciwieństwie do nawierzchni drogowej). Zwiększa to znacznie trwałość i sztywność całej konstrukcji, co ma duże znaczenie zwłaszcza w przypadku linii dużych prędkości i linii obciążonych ciężkimi pociągami towarowymi.

Wahania warunków klimatycznych (temperatura i opady atmosferyczne) znacznie wpływają na nośność i trwałość drogi kolejowej. Warstwa asfaltowa znacznie zmniejsza pionowe osiadanie podłoża gruntowego. Badania [2] wykazały, że w okresie pięciu lat obserwacji pionowe osiadanie konstrukcji z warstwą asfaltową było mniejsze o 60 do 80% w stosunku do typowej konstrukcji nawierzchni i podtorza. Osiadanie gruntu jest w znacznym stopniu zależne od wilgotności. Różnice w nasyceniu wodą gruntów przykrytych i nie przykrytych warstwą asfaltową ilustruje rys. 3.



Rys. 3. Porównanie nasycenia wodą gruntów podtorza pod torowiskiem z warstwą asfaltową (a) i bez warstwy asfaltowej (b) po pięciu latach eksploatacji [12]
(Liq. Sat.: nasycenie wodą – bezwymiarowy parametr wyrażony częścią całości)

Podobnie jak w nawierzchniach dróg samochodowych, tak i na drogach kolejowych podjęto próby zastosowania mieszanki mineralno-asfaltowej zmodyfikowanej gumą ze zużytych opon samochodowych [12]. Zastosowano asfalt zmodyfikowany dodatkiem 20% gumy. Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały możliwość zmniejszenia drgań nawierzchni i hałasu generowanych przez pociągi (rys. 4).



Rys. 4. Porównanie amplitudy drgań: 1) warstwy podsypki tłuczniowej, 2) warstwy asfaltowej zmodyfikowanej gumą [12] (ballast, ang. Rubber Modified Asphalt Concrete – podsypka, RMAC – beton asfaltowy zmodyfikowany gumą)

Stwierdzono, że warstwa z betonu asfaltowego modyfikowanego gumą:

- wykazuje większą sztywność i większy współczynnik tłumienia w szerokim zakresie warunków termicznych i ciśnienia niż konwencjonalny beton asfaltowy niemodyfikowany,
- redukuje wibracje generowane przez pociągi o dużej prędkości znacznie skuteczniej niż konwencjonalne materiały stosowane w nawierzchni,
- zmniejsza amplitudę drgań, co może znacznie zwiększyć trwałość konstrukcji nawierzchni i podtorza i zmniejszyć koszty utrzymania,
- zmniejsza wibracje, co redukuje hałas generowany przez pociąg dużej prędkości, poprawiając warunki życia okolicznych mieszkańców, jak również warunki eksploatacji budynków.

5. Przykłady zastosowania warstwy asfaltowej

Warstwa asfaltowa w nawierzchni jest stosowana od dawna na wielu liniach kolejowych. Od ponad 25 lat taka konstrukcja jest powszechnie stosowana w USA. Od 2009 roku [7] została wpisana do norm krajowych w Szwajcarii i Czechach (normalne linie kolejowe) oraz we Włoszech (KPD). We Francji, Hiszpanii, Finlandii jest przewidziana do zapisu w normach krajowych. W Hiszpanii wykonano odcinek doświadczalny na linii KDP Barcelona – granica Francji, między Sils a Riudellots. Przedstawione przykłady pochodzą z USA, Włoch i Niemiec.

USA

Warstwa asfaltowa w nawierzchni kolejowej jest stosowana od ponad 25 lat przez kompanie kolejowe w USA. Głównym powodem upowszechnienia tej technologii jest dążenie do zwiększenia efektywności transportu kolejowego, zwłaszcza że w ostatnich latach zwiększyła się masa i ładowność wagonów towarowych. Obecnie średnia ładowność wynosi 84 tony (dwukrotnie więcej niż w 1929 r.). Standardem stał się wagon o masie 91 ton i masie całkowitej 119 ton, ale już pojawiły się wagony o masie całkowitej 130 ton. Trwają też próby wagonu o masie całkowitej 143 ton.

Stosowane w USA rozwiązanie to warstwa asfaltowa o szerokości 3,7 m i grubości od 12,5 cm do 15,0 cm. W wypadku wyjątkowo słabego podłoża i na odcinkach torów o dużych naciskach, jest stosowana warstwa o grubości 20,0 cm. Grubość warstwy podsypki wynosi zwykle od 20,0 do 30,0 cm. Warstwa asfaltowa jest stosowana zarówno na nowych liniach, jak i na liniach modernizowanych [11].

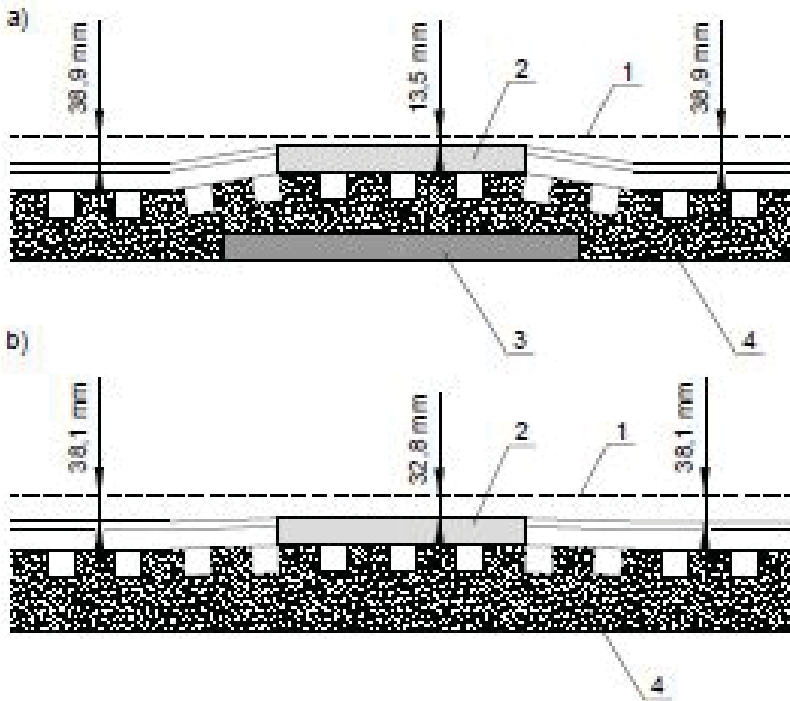
Nawierzchnia z warstwą asfaltową jest stosowana w szerokim zakresie: zarówno na typowych szlakach, jak i na specjalnych odcinkach (łuki, rozjazdy, skrzyżowania torów, dojazdy do mostów, tunele i dojazdy do tuneli, a także skrzyżowania drogowo-kolejowe).

Stosowana jest typowa mieszanka mineralno-asfaltowa – beton asfaltowy, powszechnie używany w budownictwie drogowym. Jest to mieszanka o strukturze zamkniętej (szczelna), tak samo jak w warstwach ścieralnych nawierzchni drogowych. Wymiar największego ziarna kruszywa wynosi 25 lub 37 mm. Stosowany jest zwykły asfalt naftowy. Zawartość asfaltu jest nieco większa (o 0,5% m/m) niż w nawierzchni asfaltowej – w celu uzyskania większej trwałości i szczelności (brak ryzyka deformacji trwałych). Zawartość wolnych przestrzeni waha się od 1 do 3% v/v. Moduł sztywności takiego betonu asfaltowego jest niski lub średni w porównaniu do betonu asfaltowego, stosowanego w nawierzchni drogowej. Mieszankę daje się łatwo zagęszczać (wymagana zawartość wolnych przestrzeni w zagęszczonej warstwie do 5% v/v. Zapewnia to szczelność warstwy i ochronę podłoża przed zawilgoceniem.

Zjawisko deformacji trwałych (koleinowania) w warstwie asfaltowej nawierzchni kolejowej nie występuje, ponieważ ciśnienie pod obciążeniem pociągu jest równomiernie przenoszone przez górną warstwę podsypki tłuczniowej na warstwę asfaltową. W warstwie asfaltowej nie występuje również zjawisko „pocenia” (wysię-

ku nadmiaru asfaltu), ponieważ nie ma bezpośredniego kontaktu koła z warstwą, jak też z powodu znacznie mniejszej rozpiętości temperatury (warstwa asfaltu jest chroniona przez podsypkę tłuczniovą).

W USA, oprócz zastosowań w długich odcinkach linii kolejowych, warstwa asfaltowa w nawierzchni jest często stosowana na przejazdach kolejowych [8]. Przejazdy (skrzyżowania linii kolejowych z drogami samochodowymi) z typową nawierzchnią z podsypki tłucznioviej, (pokrytej płytami betonowymi lub drewnianymi lub warstwą asfaltową), podlegają szczególnie dużym i szybkim osiadaniam, większym i szybszym w porównaniu do stref dojazdu do skrzyżowania. Ta wspólna przestrzeń jest poddana sumarycznemu obciążeniu pociągów i samochodów. Efektem tego jest powstanie znacznych nierówności drogi samochodowej w strefie przejazdu kolejowego. Wymaga to częstych napraw (w USA co trzy lata). Zastosowanie warstwy asfaltowej na przejeździe znacznie zmniejsza osiadanie nawierzchni, zapewniając większą trwałość i większe bezpieczeństwo.



Rys. 5. Przykład różnicy osiadania toru na skrzyżowaniu kolei z drogą: a) konstrukcja z warstwą asfaltową po 42 miesiącach eksploatacji, b) typowa konstrukcja po 33 miesiącach eksploatacji: 1) początkowa niweleta główki szyny, 2) przejazd, 3) podbudowa asfaltowa, 4) podsypka

Włochy

W latach 1977–1986 przy budowie pierwszej linii KDP o długości 252 km, łączącej Rzym z Florencją, rozważano dwa warianty wzmocnienia podtorza i na-

wierzchni kolejowej: beton lub asfalt. Wybór padł na asfalt, a przemawiały za tym: łatwość wykonania, mniejsze koszty i większa trwałość. Typowa konstrukcja to:

- 35 cm – warstwa podsypki tłuczniowej,
- 12 cm – warstwa asfaltowa, $E_0 = 200$ MPa,
- 30 cm – ulepszone podłoże gruntowe, $E_0 = 80$ MPa.

Należy zwrócić uwagę na wysokie, wymagane wartości modułu warstwy asfaltowej i ulepszonego podłoża gruntowego.



Rys. 6. Sieć KDP we Włoszech w budowie od 2009 r. {10}

Dobre doświadczenia uzyskane przy budowie i eksploatacji tej linii, stanowiły podstawę do rozpowszechniania takiej konstrukcji toru kolejowego na sieci KDP o łącznej długości 1 200 km (rys. 6). Na tej sieci przewidziano zastosowanie około 1,9 mln m³ mieszanki mineralno-asfaltowej jako warstwy nawierzchni kolejowej.

Niemcy

W Niemczech najczęściej są stosowane nawierzchnie bezpodsypkowe (nonballast), tzn. nawierzchnie bez warstwy tłuczniowej. Nawierzchnia kolejowa jest montowana na podłożu gruntowym, na trzywarstwowej podbudowie z mieszanek mineralno-asfaltowych. Zastosowano system GETRAC w dwóch wersjach: GETRAC A1 w terenie odkrytym i system GETRAC A3 w tunelach (<http://www.railone.com>) - fot. 1.

Oba systemy składają się z trzech warstw asfaltowych o różnej grubości:

GETRAC A1 (teren odkryty):

- od 20 do 35 cm – nawierzchnia asfaltowa (3 warstwy), grubość zależnie od modułu podbudowy kruszywowej E_{v2} lub zastosowania warstwy podbudowy z mieszanki mineralnej związanej hydraulicznie,

- 60 cm – podbudowa tłuczniowa (50 cm przy zastosowaniu warstwy podbudowy z mieszanki mineralnej związanej hydraulicznie),
- podkłady betonowe



Fot. 1. Nawierzchnia GETRAC z systemem warstw asfaltowych na kolejach niemieckich

GETRAC A3 (tunele):

- od 15 do 30 cm – nawierzchnia asfaltowa (3 warstwy), grubość zależnie od modułu podbudowy kruszywowej E_{v2} lub zastosowania warstwy podbudowy z mieszanki mineralnej związanej hydraulicznie,
- 60 cm – podbudowa tłuczniowa (50 cm przy zastosowaniu warstwy podbudowy z mieszanki mineralnej związanej hydraulicznie),
- podkłady betonowe.

W obu systemach są stosowane podkłady betonowe. Warstwy asfaltowe są wykonywane z betonu asfaltowego (AC) o różnym uziarnieniu kruszywa (do 22, 16 lub 8 mm):

- AC 22: warstwa podbudowy,
- AC 16: warstwa wiążąca,
- AC 8: warstwa wierzchnia („ścieralna”).

6. Wnioski

Budowa Kolei Dużych Prędkości oraz potrzeba zwiększenia efektywności pozostałych linii kolejowych wymaga przystosowania torów kolejowych do dużej prędkości oraz do większego obciążenia ruchem pociągów towarowych. Skutecz-

nym, sprawdzonym w wielu krajach rozwiązaniem jest nawierzchnia kolejowa z warstwą asfaltową. Obszerne badania i obserwacje wykonanych w świecie odcinków wykazały, że warstwa asfaltowa w nawierzchni znacznie zwiększa nośność i trwałość torowiska. Warstwa asfaltowa zwiększa sztywność nawierzchni oraz zapewnia ochronę podtorza i podłoża gruntowego przed wnikaniem wody. Warstwa asfaltowa pozwala na zmniejszenie wysokości konstrukcji nawierzchni. Oprócz zastosowania na długich odcinkach linii kolejowych, skutecznie jest stosowana na skrzyżowaniach kolejowo-drogowych, dojazdach do mostów, dojazdach do tuneli i w tunelach.

Wykonanie warstwy asfaltowej w nawierzchni kolejowej nie jest trudne w projektowaniu i budowie. Wykorzystywane są doświadczenia z budowy dróg samochodowych. Stosowane są typowe mieszanki mineralno-asfaltowe betonu asfaltowego z nieco większą niż w budowie dróg samochodowych zawartością asfaltu. W wykonawstwie jest stosowany typowy sprzęt do budowy dróg: wytwórnice mieszanek mineralno-asfaltowych, rozkładarki, walce, samochody dostawcze.

Ostatnia decyzja Ministra Transportu dotycząca odsunięcia w czasie budowy Kolei Dużych Prędkości w Polsce zapewne radykalnie zmieni kierunki działań i aktywność środowiska kolejowego. Warto jednak podjąć prace badawcze nad zastosowaniem nowych konstrukcji nawierzchni kolejowych i podtorza. Jest to ważne, jeśli nawet nie dla Kolei Dużych Prędkości, to w celu zwiększenia nośności i trwałości dróg kolejowych.

Bibliografia

- [1] Asphalt in Railways Track. EAPA European Asphalt Pavement Association, October, 2003.
- [2] Ferreira T., Teixeira P.F., Cardoso R., Effects of incorporating a bituminous subballast layer on the deformation of railway trackbeds. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Tutumluer & Al-Qadi (eds), 2009 Taylor & Francis Group, London.
- [3] Hensley M.J., Rose J.G.: Design, Construction and Performance of Hot Mix Asphalt for Railway Trackbeds. 1st World Conference of Asphalt Pavements. Sydney, Australia, 2000.
- [4] Huang Y. H., Lin C., Deng X., Rose J.: KENTRACK – A Computer Program for Hot-Mix Asphalt and Conventional Ballast Railway Trackbeds. Asphalt Institute (Publication RR-84-1) and National Asphalt Pavement Association (Publication QIP-105), 1984.
- [5] Ishikawa T., Kamei T., Sekine E., Ohnishi Y., Evaluation of roadbed stiffness on bearing capacity of railroad ballast with discontinuous analysis. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Tutumluer & Al-Qadi (eds), 2009 Taylor & Francis Group, London.
- [6] Rose J., Hot Mix Asphalt in Railway Tracks. „Asphalt”, Fall, 2006.

-
- [7] Rose J.G., Dingqing Li, Lindsay A. Walker, Tests And Evaluations of In-Service Asphalt Trackbeds. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, 2002. Annual Conference & Exposition, September 24, 2002, Washington, DC.
- [8] Rose J.G., Swiderski M. G., Anderson J.S., Long-Term Performances of Rail/Highway At-Grade Crossings Containing Enhanced Trackbed Support. TRB 88th Annual Meeting, 2009.
- [9] Standardy techniczne. Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 200$ km/h (dla taboru konwencjonalnego) / 250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem). Tom 1. Droga szynowa. Wersja 1.1. Warszawa, PLK, CNTK, 2009.
- [10] Teixeira P.F., State-of-the-Art on the Use of Bituminous Subballast on European High-Speed Rail Lines. Bearing Capacity of Roads. „Railways and Airfields”. Pre-Conference Workshop, 2009.
- [11] Todorovich P., Schned D., Lane R., High-Speed Rail International Lesson for U.S. Policy Makers. Policy Focus Report. Lincoln Institute of Land Policy, Cambridge, USA, 2011.
- [12] Xiangwu (David) Zeng, Rubber Modified Asphalt Concrete for High Speed Railway Roadbeds. Final Report for High-Speed Rail IDEA Project 40. Dept. of Civil Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio. March, 2005.