

SYBILSKI Dariusz¹

Podtorze kolejowe z zastosowaniem warstw asfaltowych

WPROWADZENIE

W Polsce trwają przygotowania do budowy Kolei Dużych Prędkości (KDP). Dyskusje w środowisku fachowców i w mediach dotyczą przede wszystkim odpowiedniego taboru kolejowego, przebiegu linii kolejowych, terminu rozpoczęcia i zakończenia budowy oraz oczywiście 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 nawierzchni kolejowej.

HISTORIA I PRZYSZŁOŚĆ

Pierwsza szybka kolej łącząca Tokio i Osakę (historyczny pociąg Tokaido Shinkansen zwany też pociągiem - pociskiem, fot. 1) została wybudowana w Japonii i otwarta do użytku w 1964 r. Początkowo prędkość Shinkansen wynosiła wówczas 210 km/h, ale w późniejszym czasie zwiększyła się do 270 km/h.

Od daty tego wydarzenia wybudowano trasy kolei dużych prędkości w 14 krajach. Obecny i przyszły stan Kolei Dużych Prędkości przedstawia tablica 1 (raport Instytutu Lincolna, Cambridge, USA [1]).



Fot. 1. Uroczyste otwarcie pierwszej Kolei Dużych Prędkości Tokaido Shinkansen, Tokio, Japonia, 1964

¹ Prof. zw. dr hab. inż., Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Politechnika Lubelska

Tab.1. Koleje Dużych Prędkości w użyciu i w budowie w świecie

Kraj	W użyciu				W budowie			Łącznie		
	Pierwszy rok w użyciu	Długość tras, km	Udział, %	Maks. prędkość, km/h	Długość tras, km	Udział, %	Maks. prędkość, km/h	Długość tras, km	Udział, %	Liczba pasażerów rocznie, mln
Chiny	2003	6 300	37,2	350	4 339	55,9	350	10 638	43,1	290,5
Japonia	1964	3 146	15,7	305	378	4,9	370	3 042	12,3	288,8
Hiszpania	1992	2 057	12,2	305	1 767	22,7	305	3 824	15,5	28,8
Francja	1981	1 896	11,2	320	209	2,7	320	2 107	8,5	114,4
Niemcy	1991	1 284	7,6	305	378	4,9	305	1 662	6,7	73,7
Włochy	1981	924	5,5	305	-	-	-	924	3,7	33,4
Południowa Korea	2004	412	2,4	305	187	2,4	305	599	2,4	3,2
USA	2000	583	2,1	240	-	-	-	583	1,5	3,2
Taiwan	2007	344	2,0	305	-	-	-	344	1,4	32,3
Turcja	2009	235	1,4	260	510	6,6	260	745	3,0	0,9
Belgia	1997	209	1,2	305	-	-	-	209	0,8	9,6
Holandia	2009	121	0,7	305	-	-	-	121	0,5	6,0
Wielka Brytania	2003	113	0,7	305	-	-	-	113	0,5	9,2
Świat Łącznie	-	16 919	100	-	7 768	100	-	24 687	100	928,4

Obecnie międzynarodowa definicja kolei dużych prędkości określa minimalną prędkość 250 km/h. Ta prędkość została oficjalnie przyjęta przez Unię Europejską w Dyrektywie 96/48 z 1996 r. dla kolei dużych prędkości. Dla kolei konwencjonalnych określono minimalną prędkość 200 km/h. Obecnie w 11 krajach świata szybka kolej porusza się z prędkością do 300 km/h, a w niektórych w prędkością 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 kolej dużych prędkości będzie wynosiła w świecie około 24 tys. km, a maksymalna prędkość będzie wynosiła 370 km/h (Japonia). Prognozuje się, że łączna liczba pasażerów będzie wynosiła rocznie 1 mld osób.

PODTORZE KOLEJOWE I WYMAGANIA

Typowa nawierzchnia kolejowa położona jest na podtorzu kolejowym (rys. 1) wykonanym z materiałów niezwiązanych, tj. przede wszystkim z kruszyw mineralnych (tłucznia), mogą być stosowane także odpady i materiały z recyklingu (odsiewki, kamień dołowy, żużle wielkopieczowe, popioły lotne i paleniskowe oraz gruz) [1].

Podtorze kolejowe, na którym położona jest nawierzchnia kolejowa (szyny wraz z podkładami i podsypką), przejmuje obciążenie taborem kolejowym - statycznym i dynamicznym - przekazywanym przez nawierzchnię oraz obciążenie własne nawierzchni i podtorza. Podtorze powinno zapewnić także odwodnienie nawierzchni kolejowej.



Rys. 1. Typowa konstrukcja nawierzchni i podtorza kolejowego

Uszkodzenie podtorza powodowane jest powtarzalnym obciążeniem dynamicznym przekazywanym na podsypkę i podtorze przez podkłady. Efektem jest nieregularna powierzchnia podtorza i torów. Powszechnie stosowana podsypka i podtorze z kruszywa mineralnego są podatne na powstawanie nierównomierności osiadania. Nawet zastosowanie bardzo dobrych materiałów – kruszywa o dobrym, kubicznym kształcie, dobrze zagęszczone i zapewniające odpowiednią nośność – nie gwarantuje uzyskania trwałej równej nawierzchni pod dynamicznym, cyklicznym obciążeniem w długim czasie [2].

Początki stosowania warstwy asfaltowej w podtorzu kolejowym

W USA próby stosowania warstwy asfaltowej w nawierzchni kolejowej rozpoczęto w latach 1960-tych. Inicjatorem był Instytut Asfaltowy [2]. 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. Konstrukcja torowiska z pełną warstwą asfaltową



Rys. 3. Konstrukcja torowiska z dolną warstwą asfaltową i podsypką tłuczniową

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



Rys. 4. Konstrukcja torowiska pierwszej Kolei Dużych Prędkości Shinkansen, Japonia

W 1969 r. w USA przygotowano pierwszą próbę wykonania podtorza kolejowego z warstwą asfaltową w Raton, Nowy Meksyk. Wykonano trzy odcinki testowe o długości 214 m każdy. Grubość dolnej warstwy asfaltowej podtorza wynosiła odpowiednio 63 mm, 127 mm, 190 mm. Warstwa asfaltowa została 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 warstwie asfaltowej podtorza kolejowego w długim okresie eksploatacji. Warstwa asfaltowa w podtorzu kolejowym ułożona pod warstwą podsypki tłuczniowej poddana jest w mniejszym stopniu oddziaływaniu warunków atmosferycznych (temperatura, deszcze, śnieg). Warunki te są istotnie różne od warunków w asfaltowej nawierzchni drogowej, w której zwłaszcza warstwa ścieralna poddana jest bezpośredniemu oddziaływaniu warunków atmosferycznych, powodujących starzenie asfaltu, którego efektem jest twarzenie asfaltu w nawierzchni. Po długoletniej eksploatacji starzenie asfaltu może prowadzić do spękań

powierzchniowych nawierzchni. Jak wykazały powołane badania w USA, w podtorzu kolejowym takie zjawisko nie występuje.

W USA przeprowadzono obszerne prace badawcze nad zastosowaniem warstwy asfaltowej w podtorzu kolejowym. Głównym ośrodkiem naukowym zajmującym się tym zagadnieniem jest Uniwersytet Kentucky, Lexington. Zespołem badawczym od lat kieruje prof. Jerry Rose.

W 1984 r. opracowano program komputerowy Kentrack do analizy konstrukcji podtorza kolejowego jako układu warstw sprężystych metodą elementów skończonych [2]. Program pozwala na analizę podtorza klasycznego niezwiązanego lub podtorza z warstwami asfaltowymi. Najnowsza wersja programu pochodzi z 2004 r.

Efektywność warstwy asfaltowej w podtorzu kolejowym

Zastosowanie warstwy asfaltowej w podtorzu kolejowym upowszechniło się z dwóch głównych powodów [2]:

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

W obecnych konstrukcjach kolejowych stosowane są dwa rozwiązania:

- warstwa asfaltowa w dolnej warstwie podtorza przykryta górną warstwą tłuczniową
- warstwy asfaltowe w pełnej konstrukcji podtorza, na której ułożona jest nawierzchnia kolejowa (podkłady, szyny), zwana konstrukcją bezpodsypkową.

Zastosowanie warstwy asfaltowej w konstrukcji kolejowej zapewnia zwiększenie nośności konstrukcji. Zwiększa się jej stabilność i trwałość konstrukcji. Efektem jest zmniejszenie częstości zabiegów utrzymaniowych podtorza.

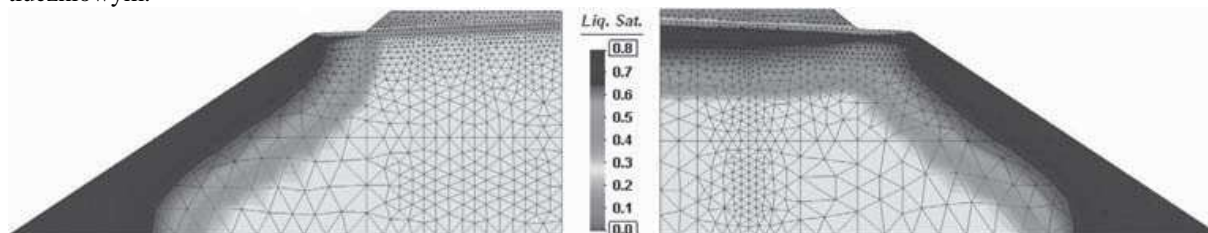
Warstwa asfaltowa podtorza pozwala także na zmniejszenie grubości konstrukcji podtorza. Jest to ważne zwłaszcza w przypadku tuneli i mostów.

Funkcje warstwy asfaltowej w podtorzu kolejowym są następujące [2]:

- stworzenie platformy roboczej, na której mogą być sprawnie wykonane instalacje elektryczne, górna warstwa podtorza i nawierzchnia kolejowa
- przeniesienie obciążenia od pociągów
- zabezpieczenie podłoża gruntowego przed przenikaniem wody deszczowej i sezonowymi zmianami termicznymi warunków atmosferycznych (cykle zamrażania – rozmrażania)
- ochrona górnej, tłuczniowej warstwy podtorza przed przenikaniem drobnych cząstek zanieczyszczeń z podłoża gruntowego
- równomierny rozkład obciążenia (ciśnienia) na podłożu gruntowe i wyeliminowanie lokalnych uszkodzeń podłoża.

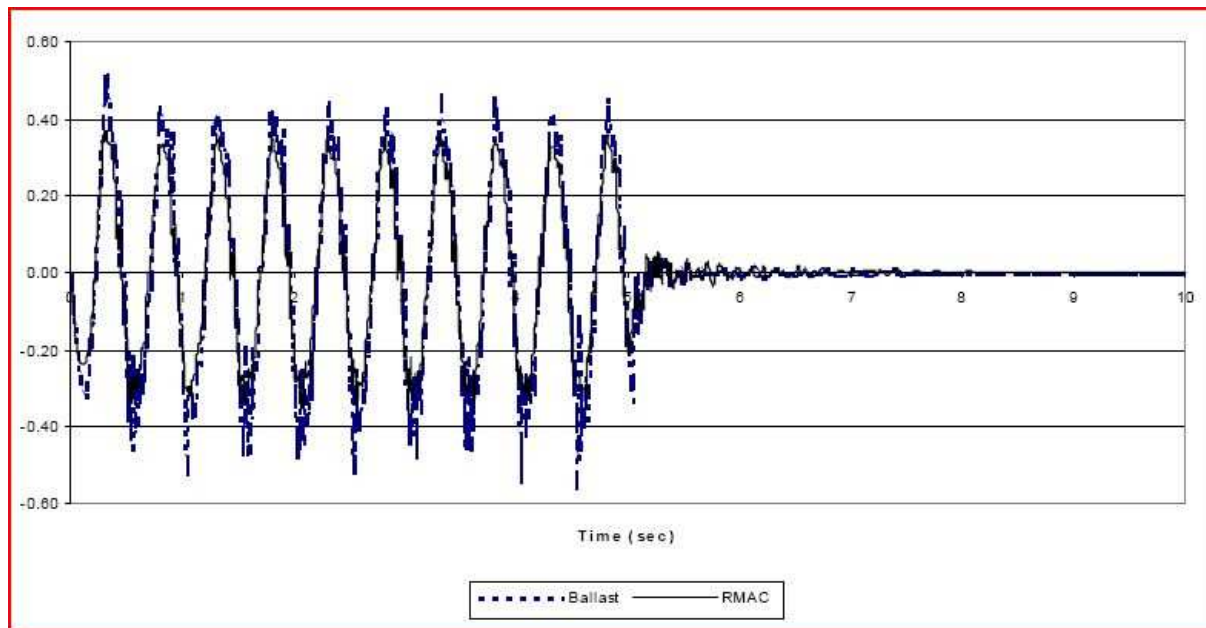
Warstwa asfaltowa w dolnej warstwie podtorza poddana jest wyłącznie ścisnaniu, co sprawia, że nie ulega zmęczeniu (brak spękań zmęczeniowych w przeciwieństwie do nawierzchni drogowej). To znacznie zwiększa trwałość konstrukcji. Większa sztywność konstrukcji ma duże znaczenie zwłaszcza w torowisku Kolei Dużych Prędkości lub w zwiększeniu nośności pod pociągi towarowe o zwiększonej masie całkowitej. Warstwa asfaltowa zapewnia równomierny rozkład obciążenia podtorza i podłoża, co zapobiega uszkodzeniom geometrii toru.

Wahania warunków klimatycznych (temperatura i opady atmosferyczne) znacznie wpływają na nośność i trwałość drogi kolejowej. Warstwa asfaltowa w podtorzu znacznie zmniejsza pionowe osiadanie podłoża gruntowego. Badania [2] wykazały, że w okresie 5-ciu lat obserwacji pionowe osiadanie konstrukcji z warstwą asfaltową było mniejsze o 60 do 80% w stosunku do typowej konstrukcji podtorza. Osiadanie gruntu jest w znacznym stopniu zależne od wilgotności. Rys. 5 ilustruje różnicę nasycenia wodą podłoża gruntowego między torowiskiem z warstwą asfaltową a typowym torowiskiem tłuczniowym.



Rys. 5. Porównanie nasycenia wodą podłoża gruntowego pod torowiskiem z warstwą asfaltową (na lewo) i typowym torowiskiem tłuczniowym (na prawo) po 5-ciu latach eksploatacji [8]

Podobnie jak w nawierzchniach drogowych, tak i w torowisku kolejowym podjęto próby zastosowania modyfikacji mieszanki mineralno-asfaltowej gumą ze zużytych opon samochodowych [2]. Zastosowano asfalt modyfikowany gumą o zawartości 20% w asfalcie. Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały możliwość zmniejszenia drgań podtorza i hałasu generowane przez pociągi (rys. 6).



Rys. 6. Porównanie amplitudy drgań podtorza tłuczniowego (na lewo) i asfaltowego modyfikowanego gumą (na prawo) [9]

Stwierdzono, że warstwa podtorza z betonu asfaltowego modyfikowanego gumą:

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

Obecne zastosowania warstwy asfaltowej w podtorzu kolejowym

W kolejnych budowlach KDP w świecie, w początkowym lub w późniejszym okresie, stosowano warstwę asfaltową w podtorzu. Konstrukcja taka jest od ponad 25 lat powszechnie stosowana w USA. Według stanu w 2009 r.[2] w Europie została wpisana w normach krajowych w Szwajcarii i Czechach (normalne linie kolejowe) oraz we Włoszech (KPD). We Francji, Hiszpanii, Finlandii jest w przygotowaniu do zapisu w normach krajowych. W Hiszpanii wykonano odcinek doświadczalny na linii kolejowej KDP Barcelona-granica Francji, między Sils a Riudellots.

Przedstawione dalej przykłady pochodzą z USA, Włoch i Niemiec.

USA

Warstwa asfaltowa w podtorzu stosowana jest przez kompanie kolejowe w USA od ponad 25 lat. Głównym powodem upowszechnienia tej technologii jest dążenie do zwiększenia efektywności transportu kolejowego. 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 stosowana jest warstwa o grubości 20,0 cm. Grubość górnej (tłuczniowej) warstwy podtorza wynosi zwykle od 20,0 do 30,0 cm. Warstwa asfaltowa stosowana jest zarówno w nowych konstrukcjach, jak i w remontowanych (wzmacnianych) torowiskach [2].

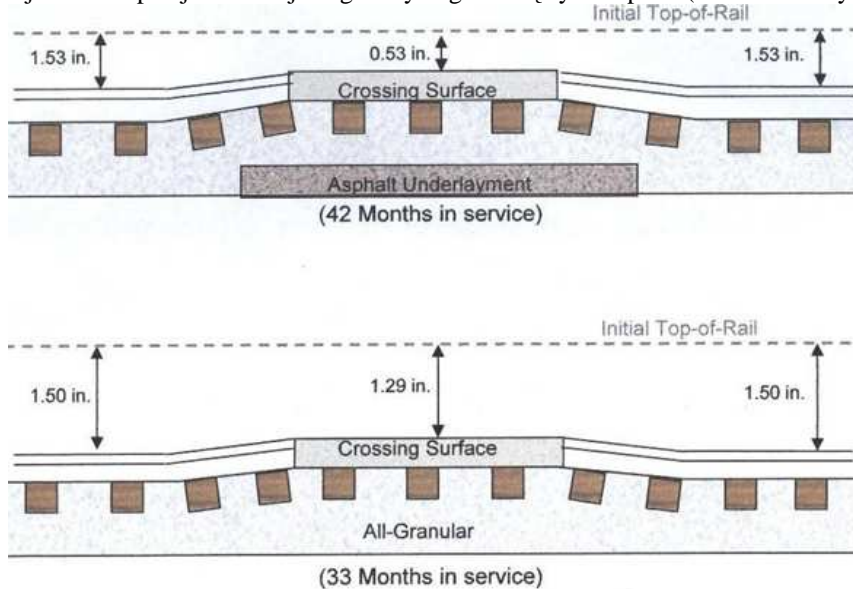
Podtorze z warstwą asfaltową stosowane jest w szerokim zakresie: typowe torowiska liniowe, specjalne odcinki (łuki, przekładnie, rozjazdy, skrzyżowania itp.) dojazdy do mostów, tunele i dojazdy do tuneli, a także skrzyżowania drogowo-kolejowe.

Stosowana jest typowa mieszanka mineralno-asfaltowa – beton asfaltowy, powszechnie używana w budownictwie drogowym. Jest to mieszanka o strukturze zamkniętej (szczelna), jak stosowana w warstwach ścieralnych nawierzchni drogowych. Wymiar największego ziarna kruszywa jest 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 jest od 1 do 3% v/v. Moduł sztywności takiego betonu asfaltowego jest niski lub średni w porównaniu do betonu asfaltowego stosowanego w nawierzchni drogowej. Mieszanka jest łatwo zagęszczana (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 podtorza kolejowego nie występuje, bowiem ciśnienie pod obciążeniem pociągu jest równomiernie przenoszone przez górną warstwę tłuczniową na warstwę asfaltową. W

warstwie asfaltowej nie występuje również zjawisko „pocenia” (wysięku nadmiaru asfaltu), ponieważ nie ma bezpośredniego kontaktu koła z warstwą, jak też z powodu znacznie mniejszej rozpiętości temperatury (warstwa jest chroniona górną warstwą tłuczniową).

W USA, obok zastosowań w długich odcinkach linii kolejowych, warstwa asfaltowa w podtorzu stosowana jest często na przejazdach kolejowych [2]. Przejazdy te (skrzyżowania tras kolejowych z drogami samochodowymi) z typową nawierzchnią z podsypki tłuczniowej (pokrytą płytami betonowymi lub drewnianymi, lub warstwą asfaltową) podlegają szczególnie dużym i szybkim osiadaniom. Większym i szybszym w porównaniu do stref dojazdu do skrzyżowania. Ta wspólna przestrzeń poddana jest bowiem sumarycznemu obciążeniu pociągów i samochodów. Efektem jest powstanie znacznych nierówności drogi samochodowej w strefie przejazdu kolejowego. Wymaga to częstych napraw (w USA co trzy lata).



1.0 in. = 25.4 mm

Rys. 7. Przykład różnicy osiadania torowiska na skrzyżowaniu kolejowo-drogowym, konstrukcja z warstwą asfaltową (górną) i typowa konstrukcja (dół)

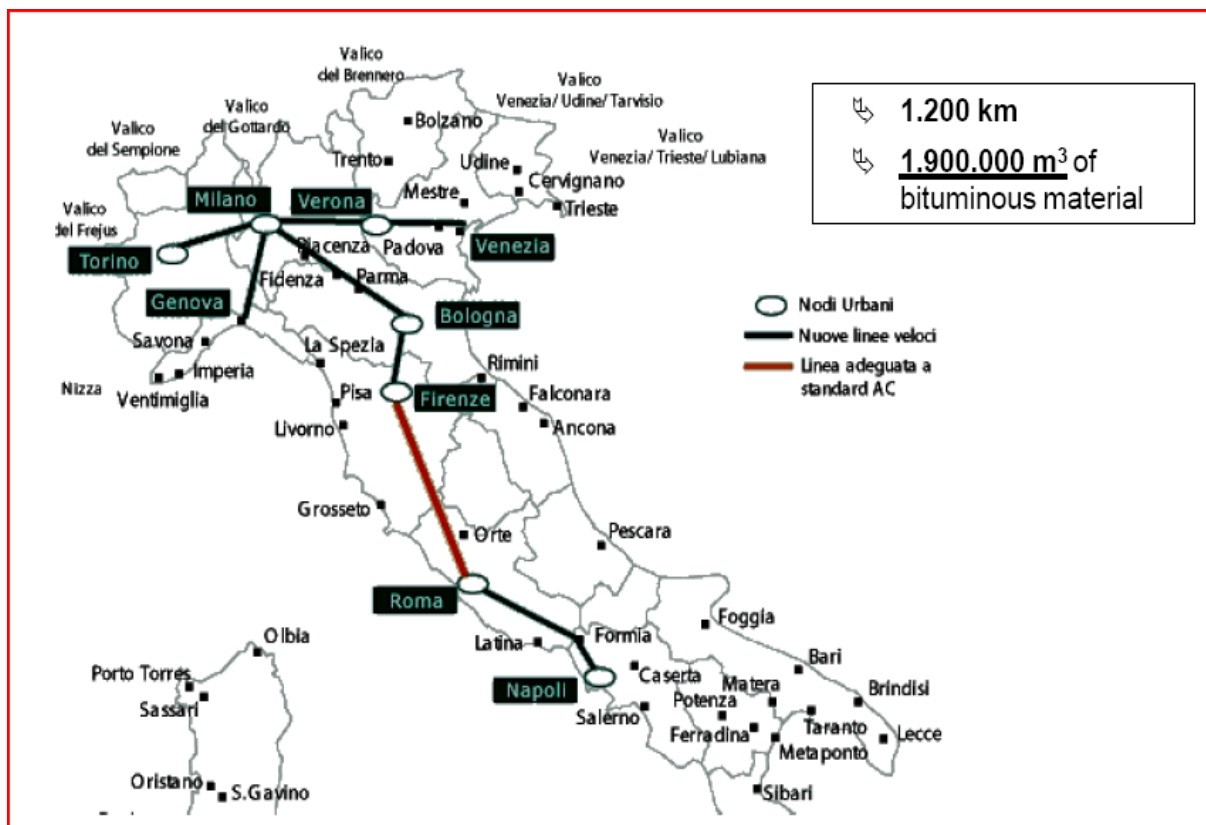
Włochy

W budowie w latach 1977-1986 pierwszej linii KDP we Włoszech łączącej Rzym z Florencją o długości 252 km rozważano dwa warianty wzmocnienia podtorza: beton czy asfalt. Wybór padł na asfalt, z przemawiało za tym: łatwość wykonania, mniejsze koszty i większa trwałość.

Typowa konstrukcja to:

- 35 cm - podsypka tłuczniowa
- 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. 8. Planowana sieć KDP we Włoszech w budowie w od 2009 r. [10]

Uzyskane dobre doświadczenia z budowy i eksploatacji tej linii stanowiły podstawę do kontynuacji takiej konstrukcji torowiska kolejowego w budowie sieci KDP we Włoszech o łącznej długości 1 200 km (rys. 8). W budowie przewidziano zastosowanie około 1,9 mln m³ mieszanki mineralno-asfaltowej jako warstwy podtorza kolejowego.

Niemcy

W Niemczech stosowane jest podtorze „bezbalastowe” (*nonballast*), tj. bez zastosowania warstwy tłuczniowej w podtorzu. Nawierzchnia kolejowa jest montowana na pełnej konstrukcji trzywarstwowej z mieszank mineralno-asfaltowych na podłożu gruntowym. Stosowany jest system pod nazwą Getrac w dwóch wersjach: Getrac 1 w terenie odkrytym i system Getrac 3 w tunelach.



Fot. 2. Przykład torowiska z systemem warstw asfaltowych Getrack w Niemczech

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

- Getrac A1 (teren odkryty):
 - 30 cm - nawierzchnia asfaltowa (3 warstwy)
 - 60 cm – podbudowa tłuczniowa
 - Podkłady betonowe
- Getrac A3 (tunele):
 - 26 cm – nawierzchnia asfaltowa (3 warstwy)
 - 60 cm – podbudowa tłuczniowa
 - Podkłady betonowe.

W oby systemach stosowane są podkłady betonowe.

Warstwy asfaltowe są wykonywane z betonu asfaltowego (AC) o różnym wymiarze kruszywa (do 22, 16 lub 8 mm):

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

ZAKOŃCZENIE I WNIOSKI

Koleje Dużych Prędkości oraz potrzeba zwiększenia efektywności normalnych linii kolejowych wymaga przystosowania torów kolejowych do dużej prędkości oraz do większego obciążenia pociągów towarowych. Skutecznym, sprawdzonym w wielu krajach rozwiązaniem jest podtorze z warstwą asfaltową. Obszerne badania i obserwacje wykonanych odcinków w świecie wykazały, że warstwa asfaltowa podtorza znacznie zwiększa nośność i trwałość torowiska. Warstwa asfaltowa zwiększa sztywność podtorza oraz zapewnia ochronę podłoża gruntowego przed wnikaniem wody.

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

Warstwa asfaltowa pozwala na zmniejszenie grubości konstrukcji torowej. Obok zastosowania na długich odcinkach linii kolejowych skutecznie jest stosowana na skrzyżowaniach kolejowych i kolejowo-drogowych, dojazdach do mostów, dojazdach do tuneli i w tunelach.

Ostatnia decyzja Ministra Transportu odsunięcia w czasie budowy Kolei Dużych Prędkości w Polsce zapewne radykalnie zmieni kierunki działań i aktywność środowiska kolejowego. Jednak trzeba zauważyć, że warto podjąć prace badawcze nad zastosowaniem nowych rozwiązań konstrukcji nawierzchni kolejowych i podtorza. Jest to ważne, jeśli nie pod kątem Kolei Dużych Prędkości, to z powodu zwiększenia nośności i trwałości dróg kolejowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] 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
- [2] 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 I. DROGA SZYNOWA. Wersja 1.1. WARSZAWA 2009. PLK, CNTK
- [3] T. Ishikawa, T. Kamei, E. Sekine, Y. Ohnishi: 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*
- [4] 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
- [5] Huang, Y. H., Lin, C., Deng, X., and Rose, J., (1984) 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), 164 pages.
- [6] Rose J.: Hot Mix Asphalt in Railway Tracks. Asphalt, Fall 2006
- [7] Asphalt in Railways Track, EAPA European Asphalt Pavement Association, October 2003
- [8] T. Ferreira, P.F. Teixeira & R. Cardoso: 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*
- [9] 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
- [10] Paulo F. Teixeira: 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] Jerry G. Rose, 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
- [12] 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