

Grzegorz Honkisz, Karol J. Kowalski

Warstwa asfaltowa w konstrukcji toru kolejowego

Rozwijająca się w sposób dynamiczny gałąź transportu lądowego, jaką jest kolej, wymaga wprowadzania innowacyjnych, bardziej skutecznych rozwiązań technologicznych z zakresu budowy nowej oraz modernizowania istniejącej infrastruktury. W celu poprawy parametrów technicznych linii kolejowych na obszarze Polski warto wykorzystać metody stosowane z powodzeniem od lat w wielu krajach na całym świecie. Do grona tego typu modyfikacji z pewnością wpisuje się, przedstawiona w niniejszym artykule, technologia zastosowania warstw z mieszanki mineralno-asfaltowej w konstrukcji toru kolejowego.

Ponad 50 lat temu, w 1964 r., w Japonii otwarto linię kolejową Tōkaidō Shinkansen, uznawaną za pierwszą na świecie linię dużych prędkości (LDP, ang. *High Speed Line*). Wówczas pociągi pasażerskie poruszały się po niej z prędkością 210 km/h, natomiast obecnie w wielu krajach realizowane są regularne przejazdy z prędkościami sięgającymi nawet 350 km/h (dot. pociągów o trakcji elektrycznej).

Znaczny wzrost prędkości pociągów pasażerskich oraz mas pociągów towarowych sprawiły, że specjaliści z branży kolejowej zaczęli wprowadzać modyfikacje konstrukcji toru, pozwalające zwiększyć jego nośność oraz trwałość. Jedną z możliwości jest wzmocnienie konwencjonalnej (podsypkowej) konstrukcji drogi szynowej za pomocą warstwy z mieszanki mineralno-asfaltowej (mma).

Typy dróg szynowych z warstwami asfaltowymi

Podstawowego podziału dróg szynowych dokonuje się w oparciu o rodzaj konstrukcji nawierzchni kolejowej; konstrukcje te dzieli się na 2 grupy: nawierzchnie podsypkowe (konwencjonalne) oraz nawierzchnie bezpodsypkowe (niekonwencjonalne). Rodzaje dróg szynowych z warstwami asfaltowymi należy podzielić w sposób adekwatny, lecz w tym wypadku dokonuje się zróżnicowania na 3 podkategorie (jak przedstawiono w tab. 1 oraz na rys. 1).

Warto zauważyć, że konstrukcje bezpodsypkowe należy zakwalifikować do drugiego rozwiązania konstrukcyjnego (pełna warstwa asfaltowa). Obecnie, poza przedstawioną na schemacie indywidualnie projektowaną warstwą pełną z zasypką tłuczniową, można zastosować również rozwiązania systemowe,

Tab. 1. Warianty konstrukcji toru kolejowego z warstwami asfaltowymi

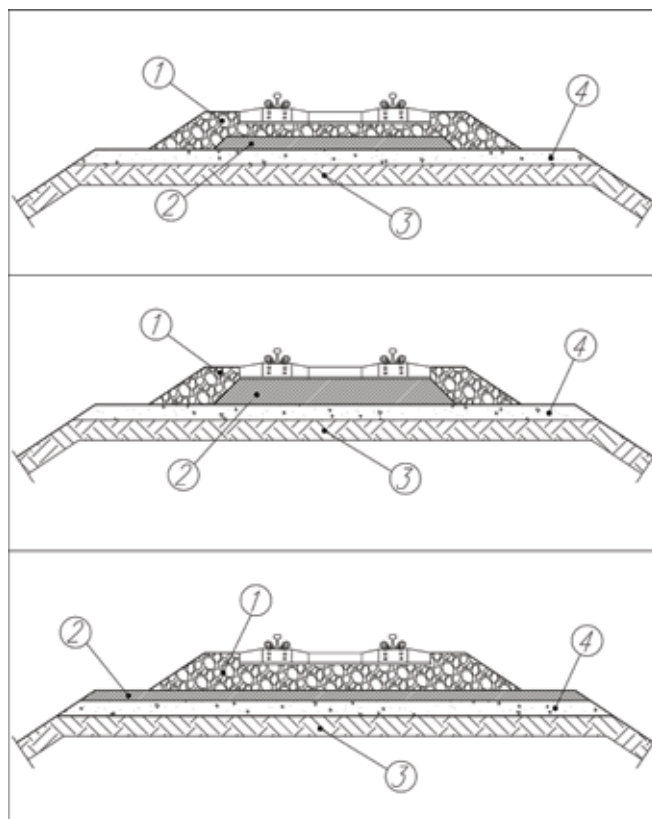
Nr	Nazwa	Opis rozwiązania
1.	Z dolną warstwą asfaltową (ang. <i>underlayment</i>)	Odpowiednik konstrukcji podsypkowej. Podczas projektowania dokonuje się doboru grubości warstwy asfaltowej oraz grubości podsypki pomiędzy mieszanką mineralno-asfaltową a podkładem.
2.	Z pełną warstwą asfaltową (ang. <i>overlayment/full depth</i>)	Rozwiązanie konstrukcyjne nawierzchni bezpodsypkowej. Wykonuje się je według projektu indywidualnego lub stosując rozwiązanie systemowe producenta.
3.	Z górną warstwą podtorza asfaltową (ang. <i>asphalt subballast</i>)	Metoda powstała na skutek połączenia nawierzchni klasycznej (podsypkowej) z podtorzem ulepszonym poprzez wbudowanie warstwy asfaltowej.

między innymi ATD, BTD, Walter, Sato, Getrac. Struktury te charakteryzują się właściwościami zbliżonymi do innych konstrukcji bezpodsypkowych, tj. wysoką trwałością i nośnością konstrukcji, szybkością i łatwością wykonania, niskim kosztem eksploatacji oraz stosunkowo wysoką ceną wykonania.

W niniejszej publikacji skoncentrowano się na rozwiązaniach przedstawionych na rys. 1. Wynika to między innymi z faktu, iż w Polsce konstrukcje podsypkowe stanowią zdecydowaną większość wybudowanych już linii kolejowych i rozwiązania tego typu są preferowane w przypadku budowy nowych oraz modernizacji istniejących torów.

Zalety i wady rozwiązania

Głównymi przyczynami rozpoczęcia prac badawczych dotyczących zabudowy warstwy asfaltowej w torze kolejowym były m.in. intensyfikacja obciążenia linii kolejowych ruchem towarowym (zwiększenie liczby cykli obciążenia w określonych przedziałach czasu), zwiększenie wartości siły nacisku osi na tor (zwiększenie mas pociągów) oraz wzrost prędkości i związanych z nią sił oddziaływania taboru na torowisko (wprowadzenie Kolei Dużych Prędkości).



Rys. 1. Typy drogi szynowej z warstwą asfaltową, zaprezentowane na przykładzie linii jednotorowej. Od góry: *underlayment*, *overlayment* oraz *asphalt subballast*

Legenda: 1 - podsypka, 2 - warstwa asfaltowa, 3 - warstwa ochronna/podbudowa z kruszywa (opcjonalna), 4 - podłoże gruntowe

Korzyści wynikające z zastosowania tego rozwiązania, wykazane przez badania oraz doświadczenia eksploatacyjne (opisane m.in. w [1, 5, 6]), są następujące:

- ❖ wzrost nośności konstrukcji – wysoki moduł sprężystości warstwy asfaltowej, który dodatkowo wpływa korzystnie na redukcję naprężeń dynamicznych;
- ❖ uzyskanie równomiernego rozkładu obciążeń pochodzących od przejeżdżającego taboru;
- ❖ zabezpieczenie podtorza (podłoża gruntowego, konstrukcji ziemnych) przed zjawiskiem nadmiernego zawilgocenia dzięki szczelności warstwy z mieszanki mineralno-asfaltowej (mma);
- ❖ zapewnienie ochrony podsypki przed zanieczyszczeniami mogącymi przeniknąć z niższych warstw konstrukcji;
- ❖ utworzenie przez warstwę asfaltową tzw. „platformy roboczej” na etapie prowadzenia robót budowlanych;
- ❖ zdecydowana poprawa elastyczności i sprężystości konstrukcji toru kolejowego – znaczna poprawa w zakresie tłumienia hałasu i drgań;
- ❖ korzyści pośrednie (eksploatacyjne) występujące w perspektywie dłuższego okresu użytkowania, które wynikają z faktu poprawy trwałości i stabilności toru;
- ❖ możliwość zastosowania materiałów z recyklingu, takich jak np. guma ze zużytych opon samochodowych, stanowiąca dodatek modyfikujący do mieszanki mineralno-asfaltowej.

Najistotniejszymi wadami opisywanej metody wzmocnienia konstrukcji toru są wzrost kosztów budowy w porównaniu do rozwiązania konwencjonalnego oraz konieczność wykorzystania doświadczenia i sprzętu budowlanego stosowanego w drogownictwie.

Projektowanie dróg szynowych z warstwami asfaltowymi

W ramach pierwszego etapu realizacji inwestycji, poza typowymi dla branży torowej pracami projektowymi, należy sporządzić dokumentację dotyczącą warstwy asfaltowej, która określa typ zastosowanej mieszanki mineralno-asfaltowej (jej skład i właściwości) oraz umiejscowienie i wymiary tego elementu konstrukcji.

Dobór składu mieszanki mineralno-asfaltowej

Mieszanka mineralno-asfaltowa wykorzystywana w budownictwie kolejowym to materiał powszechnie stosowany w budownictwie drogowym – beton asfaltowy. Podstawowymi wymogami stawianymi mma są szczelność oraz nośność, natomiast dodatkowe warunki, jak na przykład przyczepność i odporność na ścieranie, w tym przypadku mają znaczenie drugorzędne. Mając na uwadze powyższe, można stwierdzić, że najodpowiedniejszym rodzajem betonu asfaltowego będzie ten stosowany do wykonywania warstwy podbudowy w konstrukcji drogi.

Analizując bogate doświadczenie badaczy i inżynierów ze Stanów Zjednoczonych Ameryki w zakresie opisywanego rozwiązania, można uznać, że stosowane przez nich wytyczne stanowią dobrą podstawę do wypracowania własnych, krajowych instrukcji. Stosowana tam mieszanka to typowy beton asfaltowy wykorzystywany w budownictwie drogowym (autostradowym), który musi spełniać podstawowe wymogi: niski lub średni moduł sztywności, zawartość wolnych przestrzeni w zakresie 1–3% oraz możliwość uzyskania zagęszczenia podczas wbudowywania na poziomie 92–98%. Podczas wytwarzania stosuje się asfalty naftowe klasyfikowane w USA według lepkości jako AC-10, AC-20 lub AC-30, a zawartość lepiszcza asfaltowego mieści się w granicach 4–7% masy całkowitej mieszanki. Lepiszczce łączą kruszywo o uziarnieniu 0–37,5 mm, które cechuje się dość wy-

soką zawartością ziaren o wymiarze mniejszym lub równym 2,0 mm (około 50%).

Porównując powyższe zalecenia z mma stosowanymi w polskim budownictwie drogowym, najbliższe do spełnienia wymogów wydają się być mieszanki oznaczone w aktualnych normach jako AC 22 P oraz AC 32 P. Do produkcji tych mieszanek można stosować kruszywo o maksymalnych wymiarach ziaren – odpowiednio – 22 i 32 mm. Zgodnie z polskimi wytycznymi [7] stosowane do tych mieszanek lepiszcza to asfalty drogowe 35/50 i 50/70, asfalt modyfikowany PMB 25/55-60 lub asfalty wielorodrajowe 35/50 i 50/70.

Projektowanie konstrukcji drogi szynowej z warstwą asfaltową

Poza doбором składu mieszanki mineralno-asfaltowej projekt określa konstrukcję podtorza i nawierzchni kolejowej, z uwzględnieniem parametrów takich, jak m.in. grubość poszczególnych warstw.

Na samym początku prac projektowych należy określić lokalizację warstwy asfaltowej w konstrukcji toru. Położenie jej podyktowane jest priorytetowym przeznaczeniem:

- górna warstwa podtorza – poprawa odwodnienia i separacja podtorza od nawierzchni;
- dolna (lub pełna) warstwa nawierzchni kolejowej – poprawa nośności i trwałości toru.

Po określeniu podstawowych celów i powiązanego z nimi położenia warstwy asfaltowej w strukturze toru można określić jej szerokość. W przypadku układania warstwy w górnej strefie podtorza jej rozpiętość jest zazwyczaj równa szerokości korony torowiska, natomiast przy wbudowywaniu jej w nawierzchnię powinna ona wystawać o około 0,45–0,6 m poza krawędzie podkładu (szerokość całkowita od 3,4 m do 3,8 m).

Kolejnym istotnym krokiem podczas projektowania jest wyznaczenie grubości warstwy. Dokonuje się tego, stosując jedną z dwóch metod: empiryczną lub numeryczną (z wykorzystaniem programu obliczeniowego).

Większość konstrukcji torów wykonanych do tej pory posiada warstwę o grubości określonej w sposób arbitralny (pierwsza metoda) – w oparciu o doświadczenie i dane wyjściowe, takie jak lokalne warunki gruntowe, prognozowane obciążenie ruchem, zakładany maksymalny nacisk osi na tor oraz prędkość konstrukcyjna. Korzystając z dotychczasowych doświadczeń, określono, że podczas wykonywania warstwy asfaltowej w podtorzu należy zastosować warstwę o grubości od 5 cm do 15 cm. W Stanach Zjednoczonych opracowane zostały wytyczne dla konstrukcji z warstwą asfaltową w nawierzchni kolejowej, uzależniające grubości poszczególnych elementów od nośności podłoża gruntowego oraz rocznego obciążenia ruchem. Dla konstrukcji *underlayment* grubości te wahają się od 7,5 cm do 15,0 cm mieszanki mineralno-asfaltowej oraz od 12,5 cm do 61,0 cm tłucznia, natomiast w przypadku struktury *overlayment* mieszanka po zagęszczeniu powinna posiadać miąższość od 15,0 cm do 43,2 cm.

Podczas realizacji dużych inwestycji, ze względu na ryzyko poniesienia wysokich dodatkowych kosztów, podczas projektowania konstrukcji często stosuje się proces obliczeniowy wspomagany oprogramowaniem KENTRACK. Ten program komputerowy opiera się na metodzie elementów skończonych oraz teoretycznym modelem wielowarstwowym. Podstawowym celem programu jest określanie naprężeń i odkształceń w poszczególnych warstwach układu oraz prognozowanej trwałości konstrukcji dla określonego obciążenia ruchem. Kryteria zniszczenia konstrukcji określono dla 2 elementów składowych – warstwy asfal-

towej oraz podłoża. Dla warstwy z betonu asfaltowego przyjęto kryterium stosowane w budownictwie drogowym, które zakłada wystąpienie w niej nadmiernych odkształceń pochodzących od sił rozciągających (spękań zmęczeniowych). Drugim kryterium degradacji struktury są zbyt duże odkształcenia trwale mogące wystąpić w podłożu. Skuteczność opisanej metody potwierdzona została podczas realizacji programów badawczych, prowadzonych przez twórcę programu KENTRACK dr. Jerrego G. Rose'a z Uniwersytetu Kentucky, porównujących przewidziane przez oprogramowanie naprężenia i odkształcenia z wielkościami mierzonymi *in situ* [4].

Technologia budowy dróg szynowych z warstwami asfaltowymi

Niezależnie od faktu, czy warstwa z mieszanki mineralno-asfaltowej jest elementem podtorza, czy też nawierzchni kolejowej, proces budowlany jest bardzo zbliżony i stanowi połączenie budowy drogi szynowej o nawierzchni podsypkowej z budową drogi kołowej z nawierzchnią asfaltową.

Po sporządzeniu dokumentacji następuje realizacja wszystkich prac związanych z podłożem gruntowym (np. roboty ziemne – tworzenie nasypów i wykopów/przekopów). Następnie należy przygotować podtorze, które musi cechować się odpowiednimi parametrami przed ułożeniem warstwy asfaltowej, niezależnie od tego, czy stanowi ona górną warstwę podtorza, czy też element nawierzchni kolejowej. Przygotowanie podtorza może polegać jedynie na odpowiednim wyprofilowaniu konstrukcji ziemnej (gdy grunty cechują się bardzo dobrymi właściwościami), ale może też wymagać wykonania różnych prac ulepszających – na przykład wykonania separacji poprzez zastosowanie geosyntezy.

W kolejnym etapie zabudowywana zostaje mieszanka mineralno-asfaltowa. Warstwa w górnej strefie podtorza różni się od tych w nawierzchni kolejowej głównie geometrią (szerokością, grubością itp.), co ma wpływ na proces budowlany głównie w zakresie realizowanych na gruncie warstw technologicznych. Ze względu na podobną lokalizację, wymiary, sposób pracy w konstrukcji oraz wymogi stawiane gotowemu elementowi, słuszną praktyką wydaje się być wykorzystanie technologii stosowanych przy realizacji podbudów asfaltowych w budownictwie drogowym.

Podczas rozkładania mieszanki mineralno-asfaltowej można stosować metodę ręczną (prace punktowe jak rozjazdy lub przejazdy kolejowe) lub zmechanizowaną (prace liniowe, ciągłe), a następnie dokonać jej zagęszczenia przy użyciu walców drogowych. Zaleca się układanie pojedynczych warstw technologicznych o grubości dochodzącej do 14 cm. Wałowanie materiału należy przeprowadzać bezwłocznie po rozłożeniu, do momentu uzyskania właściwego wskaźnika zagęszczenia. Gdy występuje konieczność wykonania złącza w warstwie, powinno być ono wykonane w linii prostej, równoległe lub prostopadłe do osi.

Prace torowe przeprowadza się identycznie jak podczas budowy klasycznej nawierzchni kolejowej. Na początku wykonywana jest subwarstwa podsypki tłuczniowej, która powinna mieć grubość około 2/3 grubości docelowej pod podkładem. Na subwarstwę podsypki nasuwa się ruszt toru (połączone podkłady z szynami) lub rozkłada się kolejne elementy oraz łączy się je w miejscu wbudowania. Na końcu wykonywana jest regulacja toru przy użyciu podbijarki (tzw. podbijanie toru), podczas której uzupełnia się podsypkę pod podkładami oraz dookoła nich.



Rys. 2. Kolejne etapy budowy toru kolejowego o konstrukcji zawierającej warstwę asfaltową w dolnej części nawierzchni kolejowej (Stany Zjednoczone Ameryki) [2]



Rys. 3. Wykonanie warstwy asfaltowej podczas budowy linii Kolei Dużych Prędkości we Włoszech [2]

Doświadczenia międzynarodowe z zakresu budowy i eksploatacji dróg szynowych z warstwą asfaltową

W związku z faktem, że opisywana w niniejszej publikacji technologia nie znalazła jeszcze szerszego zastosowania w Polsce, przedstawiono wybrane doświadczenia międzynarodowe z jej wykorzystania.

Prace badawcze nad zastosowaniem warstw asfaltowych w torze kolejowym rozpoczęto w USA pod koniec lat 60. XX w., a intensywny rozwój technologii nastąpił w latach 90. Najczęściej stosowany w USA jest typ konstrukcji z wbudowaniem mieszanki mineralno-asfaltowej w dolnej partii nawierzchni kolejowej. Typowe rozwiązanie to warstwa asfaltowa o szerokości około 3,6 m oraz grubości z zakresu od 12 cm do 15 cm (czasem zwiększana jest do 20 cm). Wzmacniane są nie tylko linie kolejowe nowobudowane, ale również konstrukcje modernizowane. Bardzo często mieszanka wbudowywana jest odcinkowo (np. modernizacja toru w tunelu) oraz punktowo w miejscach newralgicznych (pod rozjazdami, przejazdami kolejowymi itp.). Przykład realizacji inwestycji przedstawiony został na rys. 2.

Podczas analizy doświadczeń z USA warto nadmienić o długoterminowych badaniach dotyczących eksploatacji opisywanych konstrukcji (m.in. [3]). We wspomnianej pozycji przedstawione zostały wyniki badań z eksploatowanych przez okres od 12 do 25 lat odcinków torów znajdujących się w różnych lokalizacjach. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań (wyciętych próbek warstwy, pozostałych materiałów oraz podłoża gruntowego *in situ*) potwierdzono, że konstrukcje cechują się bardzo dobrą szczelnością, nieznacznymi oznakami starzenia się lepizacza oraz brakiem uszkodzeń warstwy (typowych dla dróg kołowych). W ramach innych projektów badawczych weryfikowano, z użyciem zabudowanych w torze czujników, sposób przekazywania oraz wartości naprężeń w konstrukcji, które okazały się być kilkukrotnie niższe od wartości występujących w strukturze drogi kołowej podczas przejazdu samochodów ciężarowych [2].

Innym krajem spoza Europy o doświadczeniu w tym zakresie jest wspomniana na początku artykułu Japonia. W tym kraju stosowane są różne rozwiązania konstrukcji toru z wykorzystaniem mieszanki mineralno-asfaltowej (również bezpodsypkowe), ale najistotniejszym typem, z punktu widzenia niniejszego artykułu, jest rozwiązanie zastosowane między innymi na linii Tōkaidō Shinkansen, gdzie warstwa asfaltowa zabudowana została w górnej części podtorza. Typowa konstrukcja toru składa się kolejno z kruszywa łamanego o odpowiednim uziarnieniu i grubości warstwy 15–60 cm, mieszanki mineralno-asfaltowej o grubości 5 cm wykonywanej na całej szerokości korony torowiska i ostatecznie podsyпки tłuczniowej o grubości 25–30 cm. W ten sposób uzyskane zostało uszczelnienie konstrukcji, usprawnienie odprowadzenia wód oraz, w mniejszym stopniu, poprawa nośności toru.

Europejskie przykłady zastosowania mma w konstrukcji toru kolejowego znajdują się we Włoszech, Austrii, Francji i Hiszpanii.

We Włoszech opisywane rozwiązanie zostało wykorzystane podczas budowy sieci linii Kolei Dużych Prędkości. W tym kraju zastosowano schemat bardzo zbliżony do konstrukcji zastosowanej w Japonii, różniący się jedynie grubościami warstw: 12 cm i 30 cm odpowiednio dla mieszanki mineralno-asfaltowej oraz kruszywa łamanego. O pozytywnych doświadczeniach z wykorzystywania warstw asfaltowych w drogach szynowych świadczy fakt, że we Włoszech sumaryczna długość sieci linii KDP wynosi obecnie około 1,2 tys. km, a podczas jej budowy wykorzystano ok. 1,9 mln m³ mieszanki mineralno-asfaltowej.

Wykonywanie warstwy asfaltowej podczas budowy torów w Austrii jest częstym zabiegiem, którego stosowanie rozpoczęto już w roku 1963 (najstarszy tor kolejowy z warstwą asfaltową na świecie). Stosowane zazwyczaj rozwiązanie to zabudowa warstwy asfaltowej w górnej strefie podtorza, ale – w przeciwieństwie do konstrukcji opisanych w powyższych akapitach – w Austrii warstwa asfaltowa (o grubości 8–12 cm) rozpatrywana jest jako dodatkowa inwestycja w trwałość, która nie może wpływać na resztę struktury, tzn. zmniejszać grubości warstwy ochronnej lub podsypki. Wspomniane wzmocnienie toru stosuje się w przypadku linii obciążonych dużym ruchem (powyżej 15 000 t/dzień), wówczas następuje redukcja kosztów rocznych utrzymania toru o 3–5%, oraz przy budowie linii Kolei Dużych Prędkości.

Doświadczenia pochodzące z Francji i Hiszpanii na chwilę obecną ograniczają się do odcinków testowych. We Francji konstrukcja toru zawiera warstwę asfaltową (o grubości 14 cm i szerokości około 10,7 m), zabudowaną pomiędzy warstwą wyrównawczą (grubość 20 cm) a warstwą podsypki (grubość 30 cm), zastępując typową warstwę ochronną z kruszywa wapiennego (grubość 50 cm). W Hiszpanii mieszanka mineralno-asfaltowa została zabudowana na grubości 12–14 cm, natomiast warstwy wyrównawcza (zarazem ochronna) i podsypki mają odpowiednio 30–40 cm i 35 cm. Na wykonanych odcinkach testowych umieszczone zostały liczne czujniki (tensometry, czujniki naprężeń, temperatury oraz wilgotności), z których – po okresie kilkuletniej eksploatacji – pobrane zostaną wyniki niezbędne do weryfikacji korzyści wynikających z zastosowanej technologii.

Studium możliwości zastosowania warstwy asfaltowej w torze kolejowym w Polsce

Analiza porównawcza klasycznej konstrukcji drogi szynowej stosowanej w Polsce z konstrukcją zawierającą warstwę asfaltową oraz wersją łączącą te dwa rozwiązania (kombinowana) wykonana została w celu weryfikacji zasadności zastosowania opisywanych technologii w warunkach krajowych.

Porównania dokonano w oparciu o obowiązujące w Polsce wytyczne projektowe, które określają możliwe do zastosowania konstrukcje nawierzchni kolejowej oraz podtorza. Z użyciem programu KENTRACK poddano analizie 6 różnych konstrukcji oznaczonych numerami: I.1, I.2, I.3 (podkłady drewniane) i II.1, II.2, II.3 (podkłady strunobetonowe). Zweryfikowano 3 typy konstrukcji toru: klasyczna (. .1), z warstwą asfaltową w dolnej części nawierzchni (ang. *underlayment*) (. .2) oraz kombinowana (warstwa asfaltowa oraz warstwa ochronna z kruszywa stabilizowanego mechanicznie) (. .3). Jako bazę do tworzenia modeli porównawczych wybrano typowe dla klas torów 0 i 1 konstrukcje

Tab. 2. Warianty konstrukcji toru kolejowego z warstwami asfaltowymi

ZMIENNE	KONSTRUKCJE					
	I.1	I.2	I.3	II.1	II.2	II.3
Naprężenia ściskające na powierzchni torowiska [kPa]	52,65	46,64	41,05	44,50	40,99	37,40
Odształcenia warstwy asfaltowej [-]	nie dotyczy	0,000124	0,000101	nie dotyczy	0,000051	0,000046
Prognozowana trwałość podbudowy [lata]	22,3	39,2	62,0	41,9	62,2	83,6
Prognozowana trwałość warstwy asfaltowej [lata]	nie dotyczy	44,8	104,4	nie dotyczy	110,3	209,3

– szyny o profilu 60E1 przymocowane do podkładów drewnianych twardych (I. .) lub strunobetonowych (II. .), ułożonych w rozstawie 60 cm na podsypce o grubości odpowiednio 30 i 35 cm, która znajduje się na torowisku cechującym się minimalnym modulem odkształcenia o wartości 120 MPa.

Każda z opisanych struktur została w sposób numeryczny obciążona rocznym natężeniem ruchu o wartości 36,0 Tg, odzwierciedlonym przez liczbę 400 tys. przejazdów w ciągu roku modelem sił generowanym podczas przejazdu wagonu Eanos o masie 90 t. Ze względu na ograniczenia programu na czas obliczeń konieczne było wprowadzenie pewnych modyfikacji dotyczących: elementów konstrukcji, typu obciążenia (schematu sił) oraz warunków klimatycznych. Wyniki symulacji przedstawiono w tab. 2.

Na podstawie uzyskanych rezultatów można określić następujące zależności:

- ❖ dochodzi do redukcji naprężeń na torowisku oraz znacznego wzrostu żywotności górnej warstwy podtorza (odporności na odkształcenia trwałe) po zastosowaniu warstwy asfaltowej;
- ❖ obserwuje się dodatkową redukcję naprężeń oraz bardzo wyraźne zwiększenie odporności na odkształcenia podtorza dzięki zastosowaniu rozwiązania kombinowanego;
- ❖ następuje znaczna poprawa w zakresie odkształceń oraz trwałości warstwy asfaltowej w przypadku ułożenia jej na warstwie ochronnej o wysokim module odkształcenia (porównanie rozwiązań I.2 z I.3 oraz II.2 i II.3);
- ❖ we wszystkich analizowanych konstrukcjach z warstwą asfaltową w pierwszej kolejności następuje prognozowane uszkodzenie konstrukcji na skutek odkształcenia podtorza;
- ❖ sposób pracy programu pozwala na sformułowanie przypuszczenia, że konstrukcja z betonem asfaltowym, wbudowanym jako górna warstwa podtorza, będzie cechowała się porównywalnymi właściwościami i trwałością co konstrukcje I.2 oraz II.2, a dodatkowo będzie zapewniała lepsze odprowadzenie wód opadowych i oddzielenie nawierzchni od podłoża gruntowego.

W związku z faktem, że uzyskane prognozy trwałości to bardzo długie okresy czasu, niewspółmierne do rzeczywistych założeń projektowych, wykonana została dodatkowa analiza wariantów konstrukcji II przy zmianie schematu obciążenia toru – wprowadzono obecnie stosowany już w Stanach Zjednoczonych wagon o dopuszczalnej masie całkowitej wynoszącej 143 t. W efekcie uzyskano wyniki wynoszące nieznacznie powyżej 53 i 97 lat, odpowiednio dla wariantów II.2 i II.3.

Otrzymane w sposób numeryczny wartości naprężeń na powierzchni torowiska i odkształceń w warstwie asfaltowej oraz zakładanej trwałości konstrukcji uzupełniono o analizę ekonomiczną. Kosztorysy prac torowych służące do porównania kosztów budowy poszczególnych konstrukcji wykonano w oparciu o obowiązujący w Polsce standardowy przekrój szlakowy dwutorowej linii magistralnej. Ceny zarówno materiałów (nowych),

jak i wykorzystywania sprzętów budowlanych, pozyskano z bazy SEKOCENBUD na okres I kwartału 2014 r., natomiast cena robocizny jest zgodna z katalogiem IRS na ten sam okres dla województwa mazowieckiego. Przyjęto również założenie zysku wykonawcy robót w wysokości 20% od kosztów robocizny i sprzętu oraz ich kosztów pośrednich.

W zależności od rozwiązania konstrukcyjnego w kosztorysach zakładano następujące prace budowlane:

- ♦ mechaniczne wykonanie warstwy ochronnej o grubości 15 cm z niesortu kamiennego zlokalizowanego na terenie budowy;
- ♦ wykonanie podbudowy z mieszanki mineralno-asfaltowej AC22P o grubości 15 cm;
- ♦ mechaniczne wykonanie zagęszczonej subwarstwy tłuczni na gotowym podłożu – grubość od 15 cm do 23 cm (zależna od rozwiązania konstrukcyjnego);
- ♦ układanie toru kolejowego bezстыkowego na podkładach drewnianych lub strunobetonowych na podsypce tłuczniowej;
- ♦ materiały nawierzchniowe dla toru bezстыkowego, przytwierdzenie K lub SB-3, szyny 60E1, podkłady drewniane lub strunobetonowe;
- ♦ balastowanie torów na podsypce z tłuczni przy użyciu maszyn torowych;
- ♦ zgrzewanie szyn 60E1 w torze;
- ♦ koszty dodatkowe (m.in. transport tłuczni i przeseł torowych, przestoje lokomotywy i wagonów z przyczyn ruchowych, jednorazowa naprawa nowo ułożonych torów).

Sumaryczne kwoty wykonania 1 km drogi szynowej według poszczególnych konstrukcji, uzyskane na podstawie kosztorysów uproszczonych, przedstawia tab. 3.

Przeprowadzona analiza pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- wykonanie warstwy asfaltowej w dolnej warstwie podsypki, zamiast tradycyjnej warstwy ochronnej w podtorzu, powoduje wzrost kosztów budowy o około 285 tys. zł/km (7,5%), natomiast wykonanie konstrukcji kombinowanej o 506–507 tys. zł/km (ponad 13%);
- wbudowanie warstwy z betonu asfaltowego, częściowo zastępującej podsypkę tłuczniową, stanowi prawie 18% (723,5 tys. zł/km) kosztów wykonania konstrukcji drogi szynowej, natomiast tradycyjna warstwa ochronna z niesortu kamiennego to prawie 6% (222,4 tys. zł/km);
- wbudowanie warstwy z betonu asfaltowego jest niemalże trzykrotnie droższe od zabudowy warstwy ochronnej z kruszywa stabilizowanego mechanicznie, ale zarazem pozwala na redukcję ilości zużytego materiału i wykonanych prac w ramach warstwy podsypki tłuczniowej, co częściowo redukuje różnicę wartości.

W tab. 3 przedstawiono dodatkową alternatywę nieanalizowaną numerycznie – konstrukcja z warstwą asfaltową w górnej części podtorza na całej szerokości torowiska i nawierzchnią konwencjonalną z podkładami strunobetonowymi (wariant II.2+). Rozwiązanie to jest kosztowne ze względu na dużą szerokość elementu z mieszanki mineralno-asfaltowej oraz brak redukcji grubości podsypki.

Wartym zauważenia jest fakt, że przedstawione powyżej koszty dotyczą jedynie prac w ramach podtorza i nawierzchni kolejowej, natomiast do całkowitej wartości inwestycji kolejowej wartości te należy uzupełnić o inne koszty z zakresu branży torowej (m.in. roboty ziemne, odwodnieniowe) oraz roboty z zakresu branż okołotorowych, takie jak automatyka kolejowa (sterowanie ruchem), elektroenergetyka czy też konstrukcje inżynierskie.

Tab. 3. Sumaryczne koszty wykonania prac torowych (podtorzowych i nawierzchniowych) poszczególnych wariantów konstrukcji poddanych analizie

WARIANT	I.1	I.2	I.3	II.1	II.2	II.3	II.2+
KOSZT [tys. zł/km]	3 799	4 084	4 306	3 832	4 116	4 339	4 657

Podsumowanie

Mając na uwadze przedstawioną w publikacji charakterystykę stosowania warstw asfaltowych w konstrukcjach torów kolejowych, wynikającą z literatury tematycznej, zagranicznych doświadczeń, jak i przeprowadzonych analiz, można stwierdzić, że wzmocnienie drogi szynowej warstwą betonu asfaltowego może stanowić rozwiązanie korzystne technicznie i ekonomicznie. W związku z tym celowe wydaje się przeprowadzenie dalszych szczegółowych analiz i badań w warunkach krajowych.

Bibliografia:

1. Ferreira T. M., Teixeira P. F., Paulo F., Cardoso M. R., *Influence of Incorporating a Bituminous Sub-Ballast Layer on the Deformations of Railway Trackbed*, Instituto Superior Tecnico – Universidade Tecnica de Lisboa, Lisboa 2008.
2. Rose J. G., *Asphalt Trackbeds Design, Evaluation and Utilization*, [in:] J. G. Rose, *Railroad Track Design Including Asphalt Trackbeds*, 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, University of Illinois, 2009.
3. Rose J. G., Bryson L. S., *Hot Mix Asphalt Railway Trackbeds: Trackbed Materials, Performance Evaluations, and Significant Implications*, 2009 International Conference on Perpetual Pavements, Columbus 2009.
4. Rose J. G., Su B., Twehues F., *Comparisons of Railroad Track and Substructure Computer Model Predictive Stress Values and In-Situ Stress Measurements*, American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Assoc., Nashville 2004.
5. Rose J. G., Teixeira P. F., Veit P., *International Design Practices, Applications, and Performances of Asphalt/Bituminous Railway Trackbeds*, GeoRail, Paris 2011.
6. Sybilski D., *Nawierzchnia kolejowa z warstwami asfaltowymi*, „Problemy Kolejnictwa” 2012, z. 156.
7. WT-2:2014 *Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych*, GDDKiA

Autorzy:

mgr inż. **Grzegorz Honkisz** – absolwent Wydziału Inżynierii Lądowej na Politechnice Warszawskiej
dr inż. **Karol J. Kowalski** – Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, Politechnika Warszawska

Asphalt layer in a railway track structure

Railways is a constantly and dynamically developing branch of a continental transportation, requires innovative, more efficient and progressive solutions for construction of new and modernization of existing infrastructure. To improve technical parameters of railway lines located in Poland, employment of the processes well-developed during years of usage in many countries around the world seems to be worth of consideration. One of such methods is utilization of asphalt layers in a railway track structure, which is described in this article.