

Analiza wpływu technologii wykończenia nawierzchni betonowych na wybrane cechy eksploatacyjne

Analysis of the impact of concrete pavement finishing technologies on selected exploitation traits



Piotr Mackiewicz

Dr hab. inż.

*Politechnika Wroclawska,
Zakład Dróg i Lotnisk*

piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl



Antoni Szydło

Prof. dr hab. inż.

*Politechnika Wroclawska,
Zakład Dróg i Lotnisk*

antoni.szydlo@pwr.edu.pl

Streszczenie: W publikacji przeprowadzono studia nad różnymi technologiami wykończenia górnych warstw powierzchni nawierzchni betonowych. Analizy wykonano na podstawie badań własnych na wybranych odcinkach dróg autostradowych i ekspresowych w Polsce o nawierzchni betonowej. Na tej podstawie ustalono zmienność równości i tekstury w zależności od różnych typów konstrukcji, sposobów wykończenia oraz okresów eksploatacji. Stwierdzono, że na zmianę równości istotnie wpływa technologia budowy oraz typ konstrukcji, a na zmianę tekstury technologia wykończenia górnej powierzchni. Dla nawierzchni bezdylatacyjnych o ciągłym zbrojeniu uzyskano najlepszą równość. Wykazano, że wskaźnik tekstury jest mocno zależny od okresu eksploatacji nawierzchni. Dodatkowo przeprowadzono ocenę wpływu równości i tekstury na poziom hałasu w kabinie pojazdu.

Słowa kluczowe: *Tekstura; Równość; Nawierzchnie betonowe; Nawierzchnie bezdylatacyjne; IRI; MPD*

Abstract: We studied various technologies of finishing the upper layers of the concrete pavements. The analyses were made on the basis of own research on selected sections of motorway and express roads with a concrete surface in Poland. On this basis, the variability of equality and texture was determined depending on different types of structures, finishing methods and operational periods. It was found that the change of construction technology and the type of construction significantly influence the change of equality, while the technology of finishing the upper surface influences the texture. The best equality was obtained for the non-dilatation pavements with continuous reinforcement. It was shown that the texture indicator is strongly dependent on the pavement exploitation. In addition, an assessment of the impact of equality and texture on the noise level in the vehicle's cabin was carried out.

Keywords: *Texture; Roughness; Concrete Pavement; Continuously Reinforced (no joints) Pavement; IRI; MPD*

Zainteresowanie nawierzchniami betonowymi w Polsce wzrosło pod koniec ubiegłego wieku wzrosło. Do tego czasu nawierzchnie betonowe były realizowane sporadycznie na krótkich odcinkach, głównie na lotniskach, placach postojowych oraz drogach zakładowych. Dopiero w 1995 roku na autostradzie A4 wykonano pierwsze dłuższe odcinki, przeznaczone dla dużego natężenia ruchu. W dalszym etapie zrealizowano odcinek na A2 (2012 rok) w tzw. technologii odkrytego kruszywa, a następnie drogę S8 (2015 rok). Dwa odcinki eksperymentalne na A2 (2012 rok) i A4 (2004 rok) wykonano w technologii bezdylatacyjnej. Ponadto aktualnie realizuje się nawierzchnie na drogach ekspres-

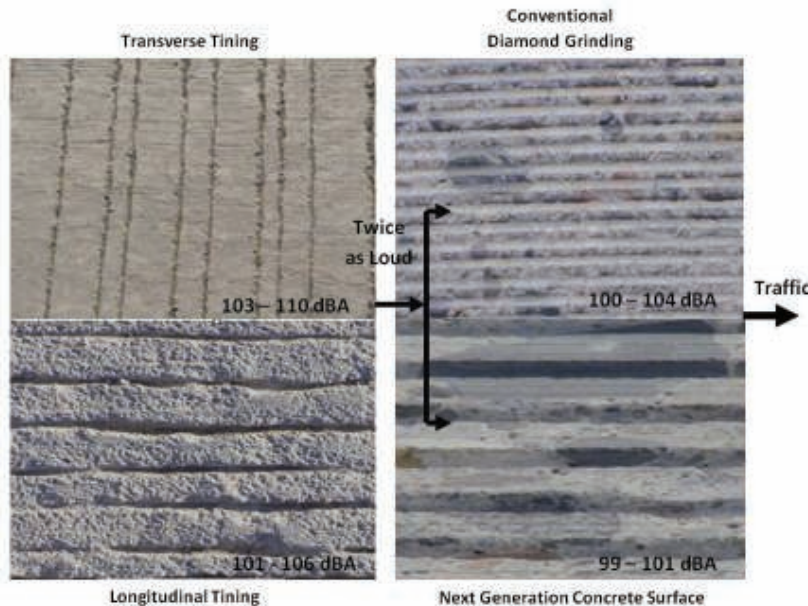
owych: S7, S8, S17, S61 oraz autostradzie A1. Poza nawierzchniami wykonanymi w nowych technologiach w eksploatacji są także starsze odcinki o nawierzchni betonowej jak np. DK50 z 2002 roku oraz autostrada A18 z lat czterdziestych ubiegłego wieku.

Aktualnie w światowej technice drogowej dla małego obciążenia ruchem znalazły zastosowanie nawierzchnie: niezbrojone i niedyblowane. Dla większych obciążeń stosuje się nawierzchnie dyblowane i kotwione (ze szczelinami poprzecznymi) oraz nawierzchnie o ciągłym zbrojeniu bez szczelin poprzecznych.

Istotnym problemem w uzyskaniu właściwej eksploatacji nawierzchni betonowych jest odpowiednie wy-

kończenie górnej powierzchni płyty betonowej, które wiąże się z cechami przeciwpoślizgowymi oraz hałaśliwością.

Celem artykułu jest identyfikacja równości (wyrażonej wskaźnikiem International Roughness Index, IRI), makrotekstury (wyrażonej wskaźnikiem Mean Profile Depth, MPD), różnych nawierzchni betonowych w Polsce w zależności od: sposobu wykończenia górnej powierzchni, okresu eksploatacji, wpływu szczelin. Parametry te są istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu oraz środowiska, gdyż wpływają na współczynniki tarcia koła i nawierzchni oraz poziom hałasu generowany przez poruszające się koła po nawierzchni.



1. Różne struktury powierzchni oraz poziomy hałasu wg [29], [8]

Przegląd doświadczeń

Pierwsze analizy strukturalne dla nawierzchni betonowych przeprowadzono już w latach 70 ubiegłego stulecia w związku z wypadkami drogowymi [10]. Federal Highway Administration (FHWA) przeanalizowała wstępnie rowkowania poprzeczne nawierzchni betonowych oraz wskazała wymagania w dostosowaniu do różnych prędkości. W dalszym etapie wprowadzono rowkowania podłużne wykonywane w postaci przeciągania maty jutowej i szcztkowania.

Kolejne obszernie wnioski z badań zestawiono w opracowaniu z 1996 roku [20]. Na podstawie wyników stwierdzono, że wykończenia powierzchni ma istotny wpływ nie tylko na parametry tarcia, ale także na wartości częstotliwości hałasu, jednak bez zmiany ogólnego poziomu hałasu.

W raporcie [24] zawierającym obszernie badania na 57 odcinkach badawczych w Kolorado zawarto analizy pomiarów tekstury w tymi średniej głębokość profilu (MPD - Mean Profile Depth) oraz szacowanej głębokości tekstury (ETD - Estimated Texture Depth). Przeprowadzono także wstępne pomiary na dwukilometrowym odcinku nawierzchni z „odkrytym kruszywem”. W dalszym etapie prac poszukiwano tekstur dla nawierzchni betonowych zapewniających właściwie cechy szepności, a także zachowujących swoje właściwości akustycz-

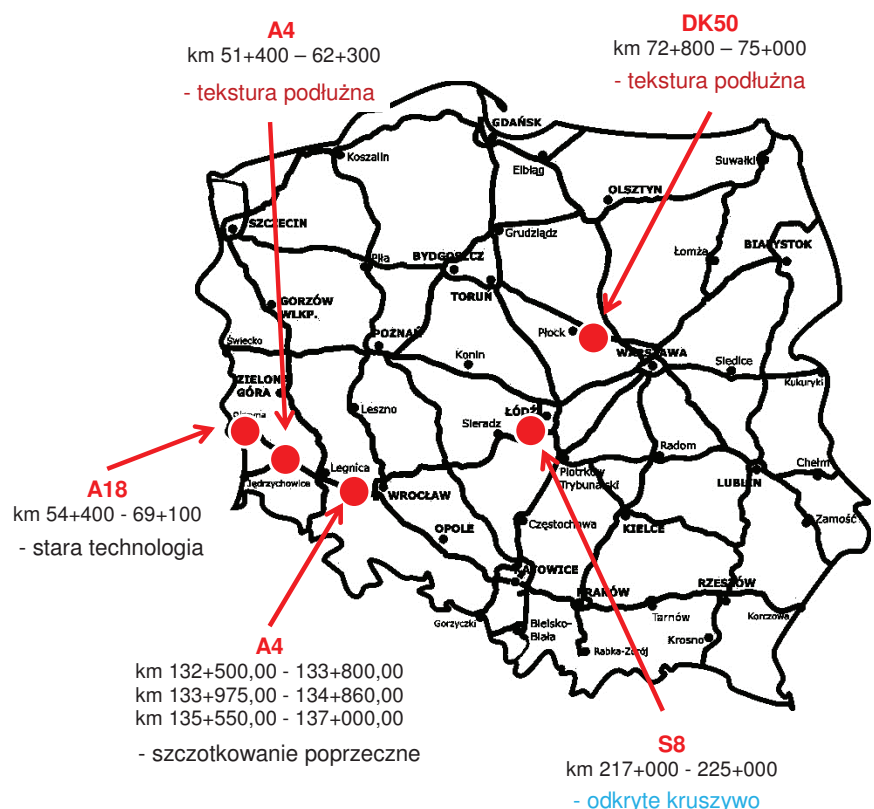
ne, niezmiennie w czasie. Analizowano różne techniki szlifowania (rys. 1, [29], [8]). Wskazano na znaczne obniżenie poziomu hałasu dla nowej technologii wykonywanej w kierunku podłużnym o nazwie Next Generation Concrete (NGCS) [5]. Ta technologia stanowi połączenie znanych już wcześniej technik wykończenia: „Grindingu” oraz „Groovingu”.

W zakresie innych prac przeanalizowano zalety także ciągniętej maty jutowej [6], [12], [27], struktur losowych [19] i betonowych nawierzchni poro-

watych [25]. Wiele opracowań zawiera technologie i wytyczne wykonywania różnych tekstur powierzchni [1], [16], [17], [11]. Przeprowadzono także analizy w zakresie pomiaru i identyfikacji równości i tekstury różnymi metodami [4], [3], [21], [18], [15] wskazując dobre korelacje między nimi.

Szczególną uwagę skupiono na specjalne teksturowanie nawierzchni betonowych w Europie. Mimo, iż przeprowadzono wcześniej w Ameryce badania struktur z „odkrytym kruszywem”, to w Europie zrealizowano więcej nawierzchni w tej technologii [7], [30], [22]. Badania jednoznacznie potwierdziły skuteczność tej technologii w obniżaniu poziomu hałasu z jednoczesnym zapewnieniem wymaganych warunków tarcia koła z nawierzchnią zbliżonych do SMA. Podobne spostrzeżenia dotyczące zbliżonego hałasu nawierzchni betonowych do nawierzchni podatnych z warstwami ściernymi typu SMA potwierdzają wieloletnie badania krajowe [14], [23], [13].

Na podstawie przeglądu literatury stwierdza się, że technologia wykończenia górnej powierzchni nawierzchni betonowych ma różne tradycje w wielu krajach. Aktualnie w Polsce nie



2. Lokalizacja odcinków pomiarowych nawierzchni betonowych



3. Autostrada A4 – nawierzchnia dyblowana (z lewej) oraz o ciągłym zbrojeniu (z prawej)



4. Droga ekspresowa S8 - technologia „odkrytego kruszywa”

ma sprecyzowanych wytycznych i zaleceń w tym zakresie. Ze względu na to, że tekstura istotnie wpływa zarówno na bezpieczeństwo ruchu jak i generowany poziomy hałasu podjęto próbę przeprowadzenia kompleksowych badań i analiz dla nawierzchni betonowych. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów równości oraz makrotekstury wykonane dla różnych nawierzchni zrealizowanych w Polsce. Ustalono zależności w/w parametrów od technologii wykonania nawierzchni, rodzaju wykończenia górnej powierzchni, wpływu czynników środowiskowych, a także poziomu dźwięku rejestrowanego w kabinie pojazdu.

Charakterystyka odcinków badawczych i techniki pomiarowej

Na podstawie wybranych lokalizacji dróg autostradowych i ekspresowych w Polsce, przeprowadzono szczegółowe pomiary tekstury i równości nawierzchni betonowych z uwzględnieniem różnych technologii konstrukcji oraz wykończenia górnej powierzchni (rys. 2).

W zakresie odcinka autostrady A4 (km 132+500 – 137+000) przebadano różne typy nawierzchni betonowych: nawierzchnia dyblowana (ze szczelinami poprzecznymi) na podbudowie z kruszywa, nawierzchnia o ciągłym zbrojeniu (bez szczelin poprzecznych), nawierzchnia dyblowana (ze szczelinami poprzecznymi) na podbudowie z chudego betonu. Jezdnię północną oddano do użytku w 2005 roku, a jezdnię południową w 2000 roku. Szczeliny poprzeczne zostały wypełnione profilami. Górna powierzchnia nawierzchni wykończona została za pomocą szrotkowania poprzecznego (rys. 3).

Na drodze ekspresowej S8 (rok oddania do eksploatacji 2015 rok) na

odcinku ośmiu kilometrów przeanalizowano nawierzchnię w technologii odkrytego kruszywa (rys. 4). Nawierzchnię tworzą płyty betonowe ze szczelinami poprzecznymi na podbudowie z chudego betonu.

Dodatkowe pomiary przeprowadzono na odcinku autostrady A4 km 51+400 – 62+300 w technologii teksturowania podłużnego (mata jutowa). Na tym odcinku nawierzchnia betonowa pochodzi z roku 1995.

Odrębnej analizie poddano odcinek autostrady A18 km 54+400 – 69+100. Na tym odcinku występuje stara nawierzchnia betonowa (1940 rok) z niskim poziomem równości oraz znacznie uszkodzonymi dylatacjami.

W zakresie badań i wymagań [2], [26], [28] z wykorzystaniem profilografu laserowego przeprowadzono identyfikację parametru IRI (International Roughness Index) oraz tekstury wyrażanej wskaźnikiem MPD (średnia głębokość profilu, Mean Profile Depth): ślad prawego koła. Te parametry stosowane są w systemie DSN identyfikującym stan nawierzchni w Polsce [9].

Analiza wyników badań w zależności od technologii wykonania nawierzchni

Większość analizowanych nawierzchni betonowych została zbudowana w technologii ze szczelinami poprzecznymi. Zrealizowano jednak odcinek w technologii bezdylatacyjnej jako nawierzchnia betonowa o ciągłym zbrojeniu. Do nich należy odcinek A4 na jezdni północnej km 133+975 - 134+860.

Powszechnie uważa się [29], że połączenia poprzeczne płyt mogą przyczynić się do ogólnego wzrostu poziomu hałasu w dwóch przypadkach. Pierwsza sytuacja występuje, gdy nie

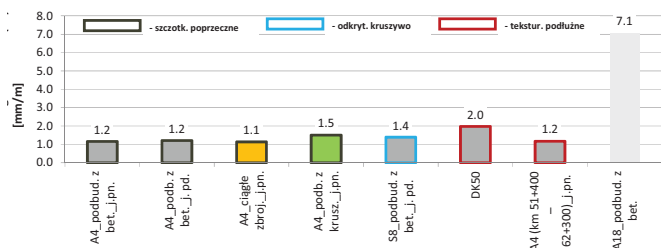
istnieje wystarczający transfer obciążenia pomiędzy płytami, wtedy opony pojazdów będą wywoływać "uderzenie w szczelinie". Gdy uskoki płyt przekraczają 4-5 mm, może to być zauważalne i niekomfortowe, szczególnie w przypadku poziomego hałasu wewnątrz pojazdu. Druga sytuacja dotyczy zbyt dużej szerokości szczeliny oraz jej jakości wypełnienia. Im szersza szczelina i źle utrzymana, tym większy poziom hałasu.

Na rys. 5 zaprezentowano wyniki pomiarów wartości wskaźnika IRI na badanych odcinkach nawierzchni dróg betonowych.

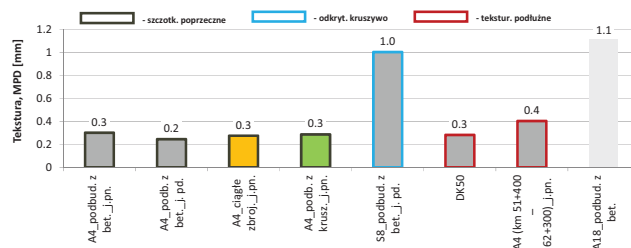
Na podstawie analizy porównawczej różnych typów nawierzchni stwierdzono, że nawierzchnia o ciągłym zbrojeniu posiada najmniejszą wartość wskaźnika IRI. Inne nawierzchnie także posiadają stosunkowo niskie wartości i mieszczą się w klasie A wg DSN, za wyjątkiem drogi DK50 (zbliżającej się do przedziału klasy B) oraz wyeksploatowanej drogi A18 znajdującej się w klasie D. Nieco odbiega także konstrukcja na podbudowie z kruszywa posiadająca IRI = 1.5 mm/m.

W przypadku wskaźnika odpowiadającego za teksturę (MPD) stwierdzono większe zróżnicowanie (rys. 6). Jednak nie jest ono podyktowane rodzajem konstrukcji, technologią wykończenia oraz okresem eksploatacji.

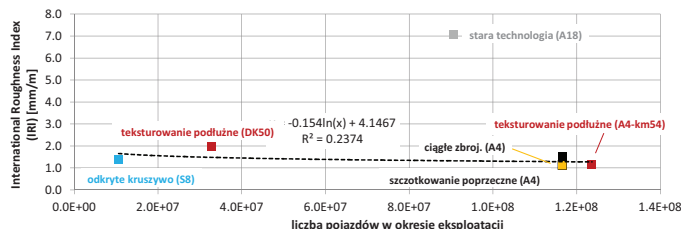
Warto zauważyć, że w jednej grupie wyników znajdują się nawierzchnie autostrady A4 o teksturze szrotkowania poprzecznego oraz odcinek autostrady A4 (km 51+400 – 62+300) i DK50 wykonane w technologii teksturowania podłużnego (ciągniona juta). Natomiast w drugiej grupie znajdują się nawierzchnie S8 wykonane w technologii „odkrytego kruszywa”. Duże wartości MPD można zawdzięczać odpowiedniej technologii wy-



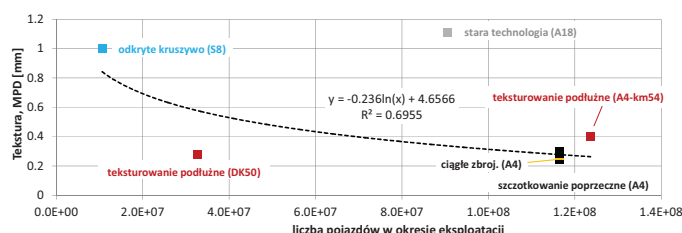
5. Wyniki porównawcze wartości wskaźnika IRI



6. Wyniki porównawcze wartości wskaźnika MPD



7. Zmiany wskaźnika tekstury IRI w zależności od liczby pojazdów w okresie eksploatacji



8. Zmiany wskaźnika tekstury MPD w zależności od liczby pojazdów w okresie eksploatacji

kończenia oraz stosunkowo młodego, dwuletniego okresu eksploatacji. Najmniejsze wartości MPD uzyskano na przeszło 15 letniej A4, na której stosowano na powierzchni szrotkowanie poprzeczne (około 0.2 mm). Nieco większe dla tekstury podłużnej (około 0.4 mm). Wyjątkowo wysoki wskaźnik tekstury występuje na starej A18, który podyktowany jest zniszczoną strukturą powierzchni oraz licznymi wykruszeniami ziaren kruszywa i zaczynu. Należy jednocześnie zaznaczyć, że badane nawierzchnie posiadają różne okresy oddania do użytku. A4 j. północna – 2005 rok, A4 j. południowa – 2000 rok, S8 – 2015 rok. Zmiany wskaźnika IRI oraz tekstury MPD w zależności od liczby pojazdów w okresie eksploatacji pokazano odpowiednio na rys. 7 oraz 8 (orientacyjnie zamieszczono wyniki dla A18).

Warto zauważyć, że znacznie więk-

sze zróżnicowanie występuje dla zmiany wskaźnika MPD. Nawierzchnie z dłuższym okresem eksploatacji i/lub wykończone w starej technologii teksturowania posiadają „gorszą” teksturę. Na nawierzchniach wykonanych w technologii „odkrytego kruszywa” uzyskuje się prawie czterokrotnie większe wartości tekstury MPD w porównaniu do szrotkowania poprzecznego. Tekstura wykonana w technologii szrotkowania poprzecznego (z przed kilkunastu lat) szybko uległa pogorszeniu, zdecydowanie bardziej niż teksturowanie podłużne z wykorzystaniem maty jutowej (20 lat eksploatacji), która wykazuje stały poziom wartości 0.3 – 0.4 mm. Oczywiście różnice mogą być także związane ze znacznie zróżnicowanym natężeniem ruchu, dokładnością wykonania, rodzajem materiału (betonu, kruszywa).

Najniższe poziomy dźwięku zarejestrowano na nawierzchni o ciągłym zbrojeniu (A4) oraz na nawierzchni drogi S8 wykonanej w technologii odkrytego kruszywa. Zarejestrowane poziomy dźwięku tych nawierzchni są niższe o około 3 – 6 dB w porównaniu do pozostałych nawierzchni, które posiadają dylatacje oraz wykończenie w postaci szrotkowania poprzecznego lub podłużnego. Wyjątkowo duże poziomy dźwięku zarejestrowano na A18 (95 dB). Podczas pomiarów dodatkowo były słyszalne drgania różnych elementów pojazdu. Pomiar dźwięku przeprowadzono przy prędkości 100 km/h. Przy wyższych prędkościach decydujący wpływ na hałas miały opory powietrza pojazdu.

Dalszym analizom poddano porównanie wyników pomiaru poziomu dźwięku względem wskaźnika IRI (rys. 11) oraz tekstury MPD (rys. 12).

Stwierdzono stosunkowo dobre korelacje (szczególnie dla tekstury MPD) wskazujące na istotny wpływ zarówno rodzaju konstrukcji jak i technologii wykończenia na poziom dźwięku. W przypadku nawierzchni z dylatacjami, a szczególnie mocno wyeksploatowanych zwiększa się wartość wskaźnika IRI przekraczająca wartość 2 mm/m odpowiadającą klasie B wg DSN. W przypadku wzrostu wartości wskaźnika tekstury MPD zmniejsza się poziom dźwięku w kabinie pojazdu. Nawierzchnie wykończone w technologii odkrytego kruszywa posiadające klasę

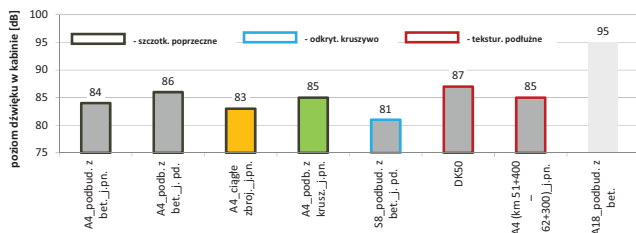


9. Aplikacja mobilna Sound Meter

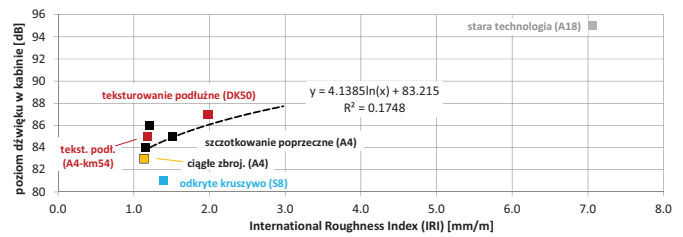
Analiza wyników badań poziomu dźwięku w kabinie pojazdu

Wykorzystując aplikację mobilną Sound Meter (rys. 9) przeprowadzono pomiary poziomu dźwięku w kabinie pojazdu benzynowego (Opel Astra). Pomiary przeprowadzono na drogach A4, S8, DK50 i A18, na odcinkach, na których przeprowadzono pomiary równości i tekstury.

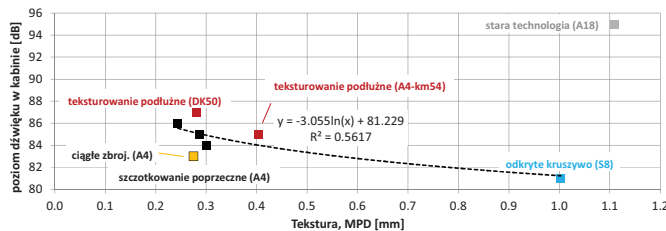
Na rys. 10 zaprezentowano wyniki pomiarów wartości poziomu dźwięku w kabinie pojazdu na badanych odcinkach dróg betonowych.



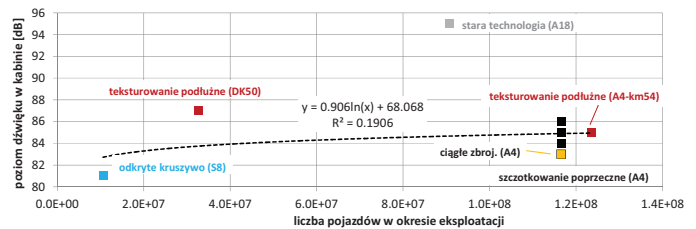
10. Wyniki porównawcze poziomu dźwięku w kabinie pojazdu



11. Korelacja wskaźnika IRI z poziomem dźwięku w kabinie pojazdu



12. Korelacja wskaźnika MPD z poziomem dźwięku w kabinie pojazdu



13. Korelacja liczby pojazdów w okresie eksploatacji z poziomem dźwięku w kabinie pojazdu

tekstury A wg DSN, są w stanie osiągnąć niższy poziom dźwięku o około 5 dB w porównaniu do klasycznych technologii szcztokowania poprzecznego. Na uwagę zasługuje także nawierzchnia o ciągłym zbrojeniu, która mimo zastosowania szcztokowania poprzecznego oraz niskiej klasy tekstury (klasa D) także wykazuje niskie poziomy dźwięku.

Pewnym wyjaśnieniem tych zależności może być korelacja poziomu dźwięku w kabinie pojazdu względem liczby pojazdów w okresie eksploatacji badanych nawierzchni (rys. 13).

Wraz ze wzrostem liczby pojazdów (okresu eksploatacji) należy spodziewać się wzrostu poziomu dźwięku o około 2 dB/ na 100 mln pojazdów.

Podsumowanie

Analiza wyników badań nad parametrami cechy eksploatacyjne nawierzchni (równość, tekstura) wykazała, że niejednorodność w mierzonych wielkościach związana jest z typem konstrukcji („dylatacyjne – bezdylatacyjne”) oraz technologii wykończenia. Analiza dotycząca wpływu typu konstrukcji w technologii bezdylatacyjnej wskazała, że nawierzchnie bezdylatacyjne charakteryzują się lepszą równością w stosunku do nawierzchni wykonanych w klasycznej technologii ze szczelinami. Większą wartość wskaźnika IRI (świadczącej o nierówności podłużnej) uzyskano dla nawierzchni na podbudowie z kruszywa, natomiast

największe na wyeksploatowanej autostradzie A18.

Nie stwierdzono wyraźnego wpływu okresu eksploatacji na równość badanych nawierzchni betonowych (za wyjątkiem A18). Istnieje jednak dobra korelacja zmiany wskaźnika tekstury MPD od liczby pojazdów w okresie eksploatacji. Stwierdzono najlepsze parametry tekstury dla stosunkowo „młodych” nawierzchni drogi S8 wykonanych w technologii „odkrytego kruszywa”. Odmienną ocenę podlega nawierzchnia betonowa na autostradzie A18. Stara, nie stosowana już technologia budowy oraz długi okres eksploatacji przyczynił się do powstania znacznych uszkodzeń w szczelinach i nierówności w profilu podłużnym.

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy wyników:

1. Proponuje się w procedurze pomiarowej równości i tekstury uwzględniać: wskaźnik IRI oraz wskaźnik MPD. Te parametry dobrze charakteryzują różne typy konstrukcji nawierzchni oraz klasyfikują je ze względu na sposób wykończenia górnej powierzchni, w tym także ze względu na różny okres eksploatacji. Powiązane są też z poziomem dźwięku rejestrowanym w kabinie pojazdu.
2. Stwierdza się, że stosowana w Polsce technologia „odkrytego kruszywa”, która sprawdziła się także

w innych krajach europejskich zapewnia dobre cechy eksploatacyjne na nawierzchniach betonowych oraz najniższe poziomy dźwięku.

3. Nawierzchnie betonowe o ciągłym zbrojeniu powinny być projektowane do obsługi ruchu bardzo ciężkiego, gdyż charakteryzują się dobrą równością niezależnie od technologii wykończenia górnej powierzchni oraz okresu eksploatacji.
4. W dalszym etapie prac autorzy przeprowadzą analizy wyników badań poziomu dźwięku wykonanymi innymi metodami (pomiar hałasu środowiskowego, metoda OBSI (On-Board Sound Intensity)).
5. Aktualnie realizowane są w kraju technologie „Grindingu” oraz „Groovingu” wraz z pomiarami cech powierzchniowych nawierzchni oraz hałasu (droga S8). Wyniki prac powinny dać odpowiedź w zakresie stosowania w kraju tych technologii.

Wybrane elementy niniejszego artykułu zrealizowano w ramach przedsięwzięcia „RID” (Ochrona przed hałasem drogowym), który jest współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad. ◀

Materiały źródłowe

- Concrete Pavements, Technical Advisory T 5040.36, 17 June, 2005
- [1] American Concrete Pavement Association, Concrete Paving Technology: Constructing Smooth Concrete Pavements, Report RB006P, 2003
- [2] ASTM E 1926 – 08 Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements
- [3] ASTM E 2157 -02 Standard method for determining Mean Profile Depth using the Circular Track Meter. URL www.astm.org. Assessed 5/30/2009
- [4] ASTM International, Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth using a Volumetric Technique, Specification E965-96, 2001
- [5] Cable J.K., Wiegand P.: Surface Characteristics Next Generation Grooving and Grinding Iowa Test Site Construction, Final Report, National Concrete Pavement Technology Center, September, 2010
- [6] Cackler E.T., et. al.: Concrete Pavement Surface Characteristics: Evaluation of Current Methods for Controlling Tire-Pavement Noise, Final Report of FHWA Cooperative Agreement DTFH61-01-X-00042, Project 15, 2006
- [7] Cackler E.T.: Evaluation of U.S. and European Concrete Pavement Noise Reduction Methods, National Concrete Pavement Technology Center, Part 1, Task 2, of the ISU-FHWA, July, 2006
- [8] Development and Implementation of the Next Generation Concrete Surface, IGGA, ACPA, Report, 2016
- [9] Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów. Wytyczne stosowania, GDDKiA, Warszawa kwiecień, 2015
- [10] Farnsworth E., Johnson M.: Reduction of Wet Pavement Accidents on Los Angeles Metropolitan Freeways, SAE Technical Paper 710574, 1971
- [11] Federal Highway Administration, Surface Texture for Asphalt and Concrete Pavements, Technical Advisory T 5040.36, 17 June, 2005
- [12] Ferragut T., Rasmussen R.O., Wiegand P., Mun E., Cackler E.T.: ISU-FHWA-ACPA Concrete Pavement Surface Characteristics Program Part 2: Preliminary Field Data Collection, National Concrete Pavement Technology Center Report DTFH61-01-X-00042 (Project 15, Part 2), 2007
- [13] Gardziejczyk W., Gierasimiuk P.: Influence of texturing method on tyre/road noise of cement concrete pavement. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 1-16 (Article in Press)
- [14] Gardziejczyk W.: „Cicha” nawierzchnia drogowa jako sposób na ograniczenie poziomu hałasu od ruchu samochodowego. Inżynieria Ekologiczna, 40, 2014, 65-73
- [15] Gardziejczyk W.: Texture of road surfaces - methods of measurement, parameters evaluation and its influence on the tire/road noise. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 1, 2, 2002, 5-29
- [16] Grogg Max G., Smith Kurt D.: PCC Pavement Smoothness: Characteristics and Best Practices for Construction, Report FHWA-IF-02-025, October, 2001
- [17] Guntert & Zimmerman Const. Div., Inc.: Various Engineering Drawings, 4/20/2008.30. Minnesota Department of Transportation, Minnesota's Astro-Turf Drag Technique Texturing Concrete Pavements, 2008
- [18] Hall J.W., Smith K. L.: Littleton Texturing of Concrete Pavements, NCHRP report 634
- [19] Herman L., McAvoy D., Richardson W.: Effectiveness of Noise Barriers Installed Adjacent to Transverse Grooved Concrete Pavements. Federal Highway Administration, Job Number 134365, October 16, 2009
- [20] Hibbs O., Larson R.: Tire Pavement Noise and Safety Performance. PCC Surface Texture Technical Working Group, FHWA-SA-96-068, May, 1996
- [21] Karamihas S.M., Gillespie T.D., Perera R.W., Kohn S.D.: Diurnal changes in profile of eleven jointed PCC pavement. Proceedings of 7th International Conference on Concrete Pavements, Orlando, FL., 2001
- [22] Kowalski K.J., Bańkowski W., Król J.B., Gajewski M., Horodecka R., Świeżewski P.: Selection of quiet pavement technology for Polish climate conditions on the example of CiDRO project - Transportation Research Procedia 14, 2016, 2724-2733
- [23] Mioduszczyński P.: Przegląd hałaśliwości nawierzchni drogowych w Polsce i w innych krajach Unii Europejskiej. Metody ochrony przed hałasem. Teoria i praktyka, 1, 2013, 159-173
- [24] Noise and Texture on PCC Pavements – Results of a Multi-State Study, Report Number WI/SPR-08-99, Wisconsin Department of Transportation, June, 2000
- [25] Pitre J.G.: Improving the sound absorbing capacity of portland cement concrete pavements using recycled materials. Thesis, Bachelor of Science, University of New Hampshire, 2000
- [26] PN-EN ISO 13473-1:2005E, Charakterystyka struktury nawierzchni przy użyciu profili powierzchniowych - Część 1: Określenie średniego profilu głębokości
- [27] Rasmussen, R., Sohaney R., Fick G., Cackler E.T.: How to Design and Construct Quieter Concrete Pavements. 10th International Conference on Concrete Pavements, July 8-12, 2012, Quebec
- [28] Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 16 stycznia 2002 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących autostrad płatnych
- [29] Scofield L.: Transportation Noise and Concrete Pavements, Using Quiet Concrete Pavements as the Noise Solution, ACPA, 2009
- [30] Sommer H.: Optimierung der Lärm-mindernden Waschbetonoberfläche (Optimisation of Noise Reducing Exposed Aggregate Concrete Surfaces), Vienna (Austria): State Ministry for Economic Affairs, File 447, 1995