



PIOTR MACKIEWICZ¹⁾
ANTONI SZYDŁO²⁾
BARTŁOMIEJ KRAWCZYK³⁾

INFLUENCE OF THE CONSTRUCTION TECHNOLOGY ON THE TEXTURE AND ROUGHNESS OF CONCRETE PAVEMENTS

WPŁYW TECHNOLOGII WYKONANIA NAWIERZCHNI BETONOWYCH NA TEKSTURĘ I RÓWNOŚĆ

STRESZCZENIE. W pracy zamieszczono studia nad różnymi sposobami wykończenia górnych warstw powierzchniowych nawierzchni betonowych. Badania własne na wybranych odcinkach dróg autostradowych i ekspresowych w Polsce o nawierzchni betonowej pozwoliły przeanalizować zmienność równości i tekstury w zależności od typów konstrukcji, podbudów, temperatury, sposobów wykończenia oraz okresów eksploatacji. Wykazano, że na zmianę równości wpływa technologia budowy oraz typ konstrukcji, a na zmianę tekstury technologia wykończenia górnej powierzchni. Największe wartości równości uzyskano dla nawierzchni bezdylatacyjnych o ciągłym zbrojeniu. Wykazano, że wskaźnik tekstury znacznie zależy od okresu eksploatacji nawierzchni. Nie stwierdzono wpływu temperatury na badane parametry.

SŁOWA KLUCZOWE: IRI, MPD, nawierzchnie betonowe, nawierzchnie bezdylatacyjne, równość nawierzchni, tekstura.

ABSTRACT. The paper presents studies of different ways of finishing the top surface of concrete pavements. The authors carried out investigations on selected concrete pavement stretches of motorways and expressways in Poland and analysed the variation in roughness and texture depending on the type of pavement structure and base, the temperature, the type of surface finish and the in-service time. It has been found that the construction technology and the type of pavement structure have a bearing on roughness while the top surface finish technology has an effect on texture. The highest pavement smoothness values were measured on the jointless continuously reinforced pavements. It is shown that the texture index considerably depends on the pavement service time. No effect of temperature on the investigated parameters was observed.

KEYWORDS: concrete pavement, continuously reinforced (no joints) pavements, IRI, MPD, pavement roughness, texture.

DOI: 10.7409/rabdim.018.007

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 41, 50-370 Wrocław; piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl

²⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk; antoni.szydlo@pwr.edu.pl

³⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk; b.krawczyk@pwr.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Od połowy lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku wzrosło zainteresowanie nawierzchniami betonowymi w Polsce. Dotychczas tego typu nawierzchnie były realizowane sporadycznie na krótkich odcinkach, głównie na lotniskach, placach postojowych oraz drogach zakładowych. Pierwsze dłuższe odcinki, przeznaczone dla dużego natężenia ruchu o nawierzchni betonowej wykonano na autostradzie A4 (1995 rok). 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.

W światowej technice drogowej dla małego obciążenia ruchem znalazły zastosowanie nawierzchnie niezbrojone i niedyblowane. Dla większych obciążeń spopularyzowano nawierzchnie dyblowane i kotwione (ze szczelinami poprzecznymi) oraz nawierzchnie o ciągłym zbrojeniu bez szczelin poprzecznych. Poza zapewnieniem odpowiedniej nośności konstrukcji kluczowym elementem jest wykończenie górnej powierzchni płyty betonowej. Ta tematyka była przedmiotem wieloletnich prac i badań ze względu na trudności jednoczesnego zachowania wymaganych cech przeciwpoślizgowych oraz obniżonej hałaśliwości.

Celem artykułu jest identyfikacja równości (wyrażonej wskaźnikiem IRI, ang. *International Roughness Index*) oraz makrotekstury (wyrażonej wskaźnikiem MPD, ang. *Mean Profile Depth*) nawierzchni betonowych w Polsce w zależności od: sposobu wykończenia górnej powierzchni, okresu eksploatacji, temperatury badania, 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 koła poruszające się po nawierzchni.

2. PRZEGLĄD DOŚWIADCZEŃ I STUDIA LITERATUROWE

W zakresie doświadczeń dotyczących struktur powierzchniowych oraz pomiarów hałasu na nawierzchniach betonowych znane są liczne publikacje o zasięgu europejskim, a także i ogólnoświatowym. Analizy strukturalne dla nawierzchni betonowych przeprowadzono już w latach 70. ubiegłego stulecia w związku z wypadkami drogowymi [1]. Federal Highway Administration (FHWA) przanalizowała wstępnie rowkowania poprzeczne nawierzchni betonowych oraz wskazała wymagania w dostosowaniu do różnych prędkości. W dalszym etapie wprowadzono rowkowania podłużne

1. INTRODUCTION

In Poland the interest in concrete pavements has been growing since the mid-1990s. So far such pavements have been built sporadically on short stretches, mainly at airports and on hard standings and industrial driveways. The first longer concrete pavement stretches for heavy traffic were built on motorway A4 (1995). The exposed aggregate finish technology was used to build a stretch of pavement on motorway A2 (2012) and then road S8 (2015). Two experimental continuously reinforced (jointless) pavement stretches were built on A2 (2012) and A4 (2004).

In the world, unreinforced and undowelled concrete pavements have been built for light traffic while transversely jointed plain concrete pavements (JPCPs) with dowel bars and tie bars, and continuously reinforced pavements (without transverse joints) have been built for heavier traffic. The key requirement, besides the assurance of a proper load bearing capacity, is the proper surface finish of the concrete slab. Because of the difficulty in reconciling antiskid properties and reduced noisiness this has been studied and tested already for many years.

The aim of this paper was to identify the roughness (expressed by the international roughness index – IRI) and macrotexture (expressed by the mean profile depth – MPD) of the concrete pavements in Poland depending on the top surface finish, the in-service time, the temperature and the effect of the joints. These parameters are important for road traffic safety and the environment since they have a bearing on wheel/pavement friction coefficients and the level of noise generated by wheels rolling on the pavement.

2. REVIEW OF EXPERIENCES AND LITERATURE STUDIES

Trials of surface structures and measurements of noise on concrete pavements have been the subject of numerous Europe- and world-wide publications. Because of road accidents structural analyses of concrete pavements were undertaken already in the 1970s [1]. The Federal Highway Administration (FHWA) carried out a study of the transverse tining of concrete pavements, indicating that it had to be adjusted to different speeds. Later longitudinal tines made by dragging burlap and brooming were introduced.

The first comprehensive conclusions from the investigations were presented in 1996 [2]. On the basis of field tests carried out on concrete pavements in the years in

wykonywane w postaci przeciągania maty jutowej i szcztokowania.

Pierwsze obszerne wnioski z badań zestawiono w opracowaniu z 1996 roku [2]. Na podstawie badań w latach 1993-1995 przeanalizowano różne obszary USA uwzględniając zróżnicowane opony pojazdów, struktury powierzchni, oddziaływanie hałasu i poziomy bezpieczeństwa. 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.

1993-1995 different areas of the USA were analysed taking into account the different vehicle tyres, the surface structures, the noise impact and the safety levels. The results showed that the surface finish had a significant effect not only on the friction parameters, but also on the noise frequency values, however without a change in the general noise level.

One of the major publications is report [3] comprising extensive field tests carried on 57 road stretches in Colorado, taking into account the effect of various kinds of pavement

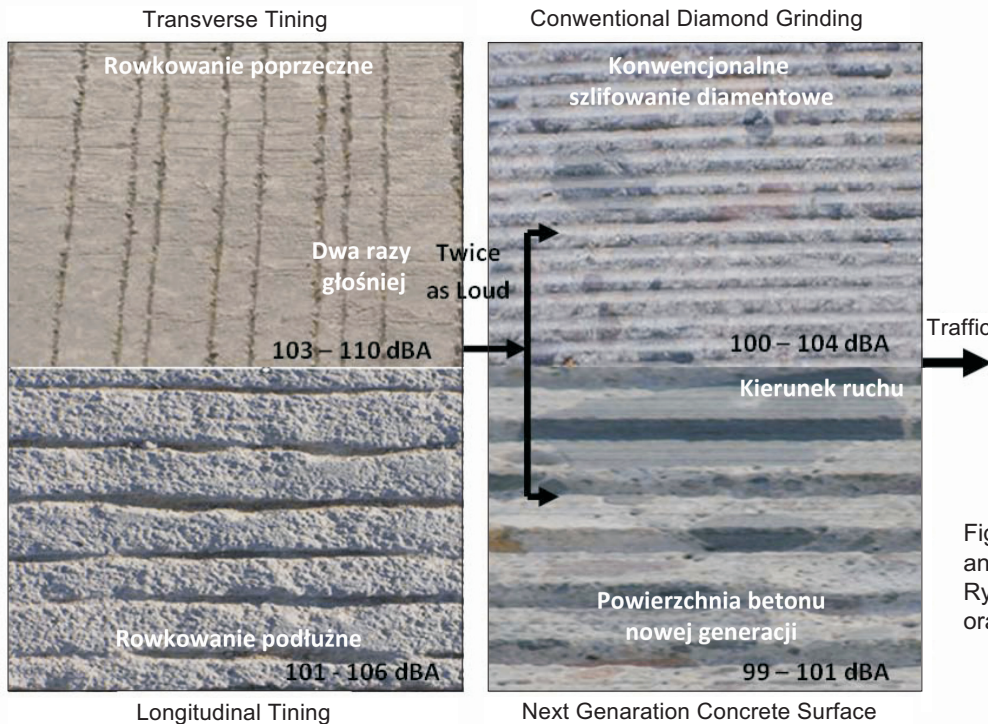


Fig. 1. Different surface structures and noise levels [4], [5]

Rys. 1. Różne struktury powierzchni oraz poziomy hałasu [4], [5]

Jedną z głównych publikacji jest raport [3] zawierający obszerne badania na 57 odcinkach badawczych w Kolorado z uwzględnieniem wpływu różnego wykończenia powierzchni nawierzchni na cechy eksploatacyjne nawierzchni. Wykonano analizy pomiarów tekstury, w tym średniej głębokości profilu (MPD, ang. *Mean Profile Depth*) oraz szacowanej głębokości tekstury (ETD, ang. *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 szcpeńności, a także zachowujących swoje właściwości akustyczne, niezmiennie w czasie. Analizowano różne techniki szlifowania (Rys. 1) [4], [5]. Wskazano na znaczne obniżenie poziomu hałasu dla nowej technologii wykonywanej w kierunku

surface finish on the pavement service characteristics. The results of texture measurements, including mean profile depth (MPD) and estimated texture depth (ETD) measurements, were analysed. Also preliminary measurements were performed on a two kilometre long stretch of pavement with the exposed aggregate finish. Later, textures for concrete pavements, which would ensure proper bond strength and preserve their time-invariable acoustic properties, were sought. Various grinding techniques were analysed (Fig. 1) [4], [5]. It was found that a considerable reduction in the noise level could be achieved using a new longitudinal tining technology, which was referred to as the next generation concrete surface (NGCS) [6]. This technology is a combination of the finishing techniques of grinding and grooving.

podłużnym o nazwie Next Generation Concrete (NGCS) [6]. Ta technologia stanowi połączenie znanych już wcześniej technik wykończenia: „Grindingu” oraz „Groovingu”.

Kontynuację zmodyfikowanych technologii szlifowania rozwinięto także podczas badań [7], [8] na wybranych odcinkach w Kalifornii stosując metodę pomiaru *On-board Sound Intensity* (OBSI). Badania wykazały znaczny rozrzut wyników dla wybranych struktur. Zaproponowano dalsze badania z uwzględnieniem diamentowej technologii rowkowania podłużnego oraz zalecono badania wpływu szczelin na poziom hałasu. W zakresie innych prac przeanalizowano zalety także ciągnionej maty jutowej [9], [10], [11], struktur losowych [12] i betonowych nawierzchni porowatych [13]. Wiele opracowań zawiera technologie i wytyczne wykonywania różnych tekstur powierzchni [14-17]. Przeprowadzono także analizy w zakresie pomiaru i identyfikacji równości i tekstury różnymi metodami [18-22] wskazując dobre korelacje między nimi. Znane są prace dotyczące wpływu opon na nawierzchnię [23], [24], [25]. Wskazano na dobrą korelację tekstury z oporami toczenia [26], [27], a także temperatury z oporami toczenia [28].

Dość ważne badania dotyczą oceny doboru kruszyw kształtujących teksturę nawierzchni. Przeprowadzono badania wskaźników tarcia pozwalające określić odporność kruszywa na polerowanie [29], [30], poślizg [31], a także odpowiednie badania mikroskopowe [32]. Szczególną uwagę skupiono na specjalne teksturowanie nawierzchni betonowych w Europie. Mimo, iż przeprowadzono wcześniej w Ameryce badania struktur z „odkrytym kruszywem”, to w Europie wykonano więcej nawierzchni w tej technologii [33-35]. 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 asfaltowych typu SMA potwierdzają wieloletnie badania krajowe [36-38].

Na podstawie przeglądu literatury stwierdza się, że technologia wykończenia górnej powierzchni nawierzchni betonowych ma różne tradycje w wielu krajach. Aktualnie w Polsce nie ma sprecyzowanych wytycznych i zaleceń w tym zakresie. Ze względu na to, że istotnie tekstura wpływa zarówno na bezpieczeństwo ruchu jak i generowany poziom hałasu podjęto próbę przeprowadzenia kompleksowych badań i analiz dla nawierzchni betonowych. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów równości oraz makrotekstury wykonane dla tych nawierzchni zrealizowanych w ostatnich latach w Polsce. Ustalono zależności korelacyjne ww. parametrów od technologii wykonania

Modifications of grinding techniques continued to be tested on selected road stretches in California, using the on-board sound intensity (OBSI) measurement method [7], [8]. The noise measurement results differed considerably between the selected surface structures. Further trials using the longitudinal diamond grinding technology were suggested and it was recommended to study the effect of joints on the noise level. As part of other research the advantages of burlap dragging [9], [10], [11], random structures [12] and porous concrete pavements [13] were analysed. Many works presented technologies and guidelines for producing different surface structures [14], [15], [16], [17]. The different methods of measuring and identifying surface roughness and texture were analysed and were found to be well correlated [18-22]. Also the effect of tyres on the pavement was examined [23], [24], [25]. Texture and rolling resistance [26], [27] and temperature and rolling resistance [28]. were found to be well correlated.

Considerable research was devoted to the evaluation of the suitability of aggregates for the pavement texture. Friction coefficients, which would make it possible to determine aggregate polishing resistance [29], [30] and skid resistance [31], were studied and proper microscopic examinations were carried out [32]. In Europe attention was focused on the special texturing of pavements. Even though it was in the USA that pavements with exposed aggregate were first studied, more such pavements were actually built in Europe [33-35]. Tests fully corroborated the effectiveness of this technology in reducing the noise level as well as in ensuring the required wheel/pavement friction conditions similar to those characterizing SMA. Similar observations, confirming that the noise level of concrete pavements is close to that of SMA pavements, emerged from such research conducted for many years in Poland [36-38].

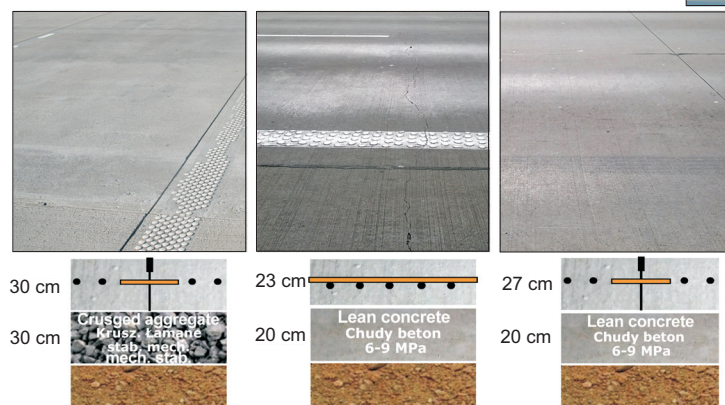
The above survey of the literature on the subject shows that the tradition of concrete pavement surface finishing differs between countries. Currently in Poland there are no specific guidelines or recommendations in this regard. Considering that texture indeed affects both road traffic safety and the level of the generated noise, an attempt was undertaken to carry out comprehensive tests and studies for concrete pavements. This paper presents the results of the pavement roughness and macrotexture measurements performed in Poland in recent years. Correlations between the above parameters and the pavement construction technology, the kind of top surface finish and the environmental factors have been determined.

nawierzchni, rodzaju wykończenia górnej powierzchni, wpływu czynników środowiskowych.

3. 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 szczelin poprzecznych lub ich braku (Rys. 2).

W zakresie odcinka autostrady A4 przebadano różne typy nawierzchni betonowych (Rys. 3): 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. Górna powierzchnia nawierzchni wykończona za pomocą rowkowania poprzecznego (szczotkowanie) oraz ciągłej juty.



Rys. 3. Typy nawierzchni badane na autostradzie A4
Fig. 3. Types of pavement tested on motorway A4

Na drodze ekspresowej S8 na odcinku ośmiu kilometrów przeanalizowano nawierzchnię wykonaną w technologii odkrytego kruszywa (Rys. 4). Nawierzchnię tworzą płyty betonowe ze szczelinami poprzecznymi na podbudowie z chudego betonu.

Trzeci odcinek pomiarowy stanowiła autostrada A2, na której przeanalizowano nawierzchnię o ciągłym zbrojeniu (bez szczelin poprzecznych) oraz dyblowaną (ze szczelinami

3. CHARACTERISTIC OF TRIAL STRETCHES AND MEASURING TECHNIQUES

Locations on motorways and expressways in Poland were selected and detailed measurements of the texture and roughness of the concrete pavements in the locations were carried out taking into account the transverse joints or their absence (Fig. 2).



Fig. 2. Locations of trial stretches on which measurements were carried out
Rys. 2. Lokalizacja odcinków pomiarowych nawierzchni betonowych

In the case of the stretch of motorway A4, different types of concrete pavement (Fig. 3) were tested: a dowelled pavement (with transverse joints) on an aggregate base, a continuously reinforced pavement (without transverse joints) and a dowelled pavement (with transverse joints) on a lean concrete base. The pavement surface had been finished by transverse tining (brooming) and burlap dragging.

The exposed aggregate type of pavement was investigated on the eight kilometre long stretch of expressway S8 (Fig. 4). The pavement has been made of transversely jointed concrete slabs on a lean concrete base.

The third trial stretch was on motorway A2. A continuously reinforced pavement (without transverse joints) and a dowelled jointed pavement (with transverse joints) on a lean concrete base, both with the exposed aggregate

poprzecznymi) na podbudowie z chudego betonu oraz górna powierzchnia wykończona w technologii odkrytego kruszywa. Uzupełniające pomiary przeprowadzono na odcinku autostrady A4 km 51+400 - 62+300 wykonanej w technologii teksturowania podłużnego (mata jutowa). 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.



surface finish were investigated there. Additional measurements were carried out on the trial stretch, longitudinally textured by burlap dragging, located at the 51+400 - 62+300 km of A4. A separate analysis was carried out on the trial stretch located at the 54+400 - 69+100 km of motorway A18. There is an old concrete pavement (built in 1940) with a low degree of smoothness and considerably damaged expansion joints.



Fig. 4. Expressway S8 – exposed aggregate finish
Rys. 4. Droga ekspresowa S8 – technologia „odkrytego kruszywa”

W zakresie badań i wymagań [39-41] z wykorzystaniem profilografu laserowego przeprowadzono identyfikację następujących parametrów:

- odczytów bezpośrednich z czujników laserowych,
- profili wzdłużnych [mm] obejmujący ślad lewego koła, linię środkową, ślad prawego koła,
- *International Roughness Index* (IRI) obejmujący ślad lewego koła, linię środkową, ślad prawego koła,
- teksturę RMS (odchylenie standardowe zarejestrowanego profilu) i MPD (średnia głębokość profilu, *Mean Profile Depth*) tj. ślad prawego koła,
- równość poprzeczną.

Zwrócono uwagę na dwa podstawowe parametry: IRI oraz MPD stosowane w systemie identyfikującym stan nawierzchni w Polsce [42] i powiązane odpowiednio z równością tekstury.

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ W ZALEŻNOŚCI OD TECHNOLOGII WYKONANIA NAWIERZCHNI

W pierwszym etapie analizy wyników szczególną uwagę zwrócono na wpływ temperatury na wyniki badanych parametrów. Na przykładzie A4 przeprowadzono badania w temperaturze od 7°C do 34°C. Wybrane wyniki na długości odcinków badawczych pokazano na Rys. 5 (równość podłużna

As regards the requirements specified in [39-41], a texture laser was used to determine:

- direct readings from the laser sensors,
- longitudinal profiles [mm] comprising the left wheel track, the centre line and the right wheel track,
- the international roughness index (IRI) comprising the left wheel track, the centre line and the right wheel track,
- the RMS texture (the standard deviation of the registered profile) and the mean profile depth (MPD), i.e. the right wheel track,
- the transverse profile.

Special attention was given to the two basic parameters, i.e. IRI and MPD, correlated with texture roughness, which are used in the surface condition identification system in Poland [42].

4. TEST DATA DEPENDING ON PAVEMENT ENGINEERING

First the test results were analysed with regard to the effect of temperature on the investigated parameters. The analysis was made for the temperature of 7-34°C, on the basis of the A4 motorway data. The selected results along the length of the trial stretches are presented in Fig. 5 (longitudinal roughness – IRI) and in Fig. 6 (transverse roughness). The

– wskaźnik IRI) i Rys. 6 (równość poprzeczna). Wyniki dla wartości średnich odpowiadającym różnym typom nawierzchni zaprezentowano na Rys. 7, 8 i 9. Nie stwierdzono istotnego wpływu temperatury na zmianę wartości parametrów IRI (Rys. 7) i MPD (Rys. 9). Nieznaczny wpływ temperatury stwierdzono dla równości poprzecznej (Rys. 8). Nie stwierdzono także wyraźnego wpływu temperatury na rejestrowane parametry w zależności od różnych typów nawierzchni. Stwierdzono dobrą powtarzalność wyników korelującą proporcjonalnie do mierzonych parametrów równości i tekstury dla danego miejsca pomiarowego. Podczas badań zarejestrowano odchylenia („skoki”) niektórych rejestrowanych wartości. Są one związane z lokalnymi nierównościami nawierzchni, stanowią odczyty jednostkowe i nie wpływają znacząco na wartości średnie z odcinków.

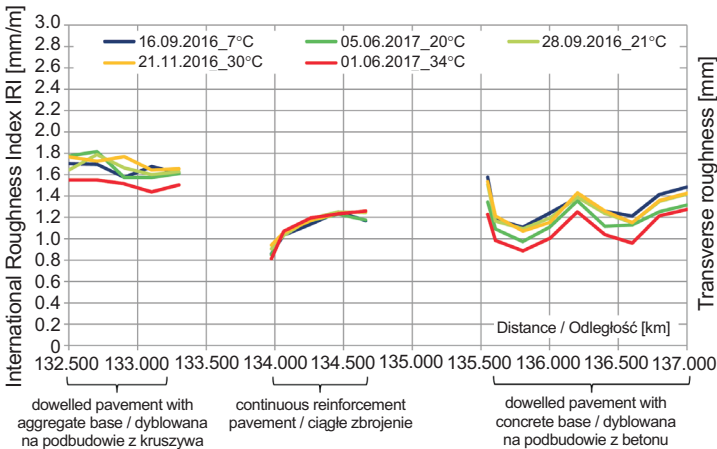


Fig. 5. Variation in IRI depending on temperature (motorway A4, transverse tining, right lane, northbound carriageway)
Rys. 5. Zmiana wskaźnika IRI w zależności od temperatury (autostrada A4, szcztokowanie poprzeczne, pas prawy, jezdnia północna)

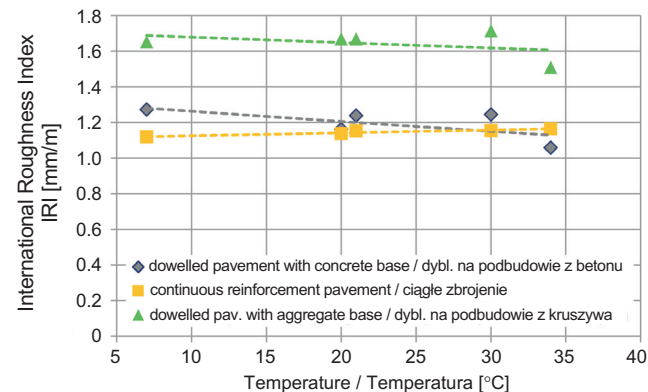


Fig. 7. Effect of temperature on IRI readings (motorway A4, transverse tining, right lane, northbound carriageway)
Rys. 7. Wpływ temperatury na odczyty IRI (autostrada A4, szcztokowanie poprzeczne, pas prawy, jezdnia północna)

averaged results for the different types of pavement are presented in Figs 7, 8 and 9. Temperature was found to have no significant effect on IRI (Fig. 7) and MPD (Fig. 9). A slight effect of temperature was observed for transverse roughness (Fig. 8). For the different types of pavement, temperature was found to have no distinct effect on the investigated parameters. The repeatability of the results was good and proportionally correlated with the roughness and texture parameters measured in the particular measuring place. During the measurements deviations (jumps) of some of the registered values were recorded. They were due to local surface irregularities and were singular readings which had no significant effect on the mean values for the trial stretches.

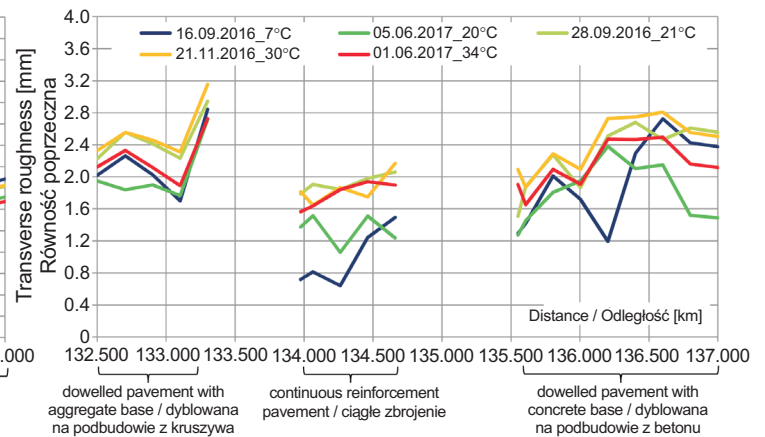


Fig. 6. Variation in transverse roughness depending on temperature (motorway A4, transverse tining, right lane, northbound carriageway)
Rys. 6. Zmiana równości poprzecznej w zależności od temperatury (autostrada A4, szcztokowanie poprzeczne, pas prawy, jezdnia północna)

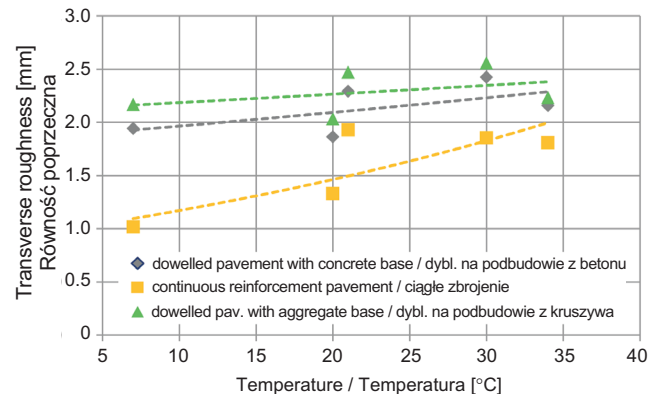


Fig. 8. Effect of temperature on transverse roughness (motorway A4, transverse tining, right lane, northbound carriageway)
Rys. 8. Wpływ temperatury na równość poprzeczna (autostrada A4, szcztokowanie poprzeczne, pas prawy, jezdnia północna)

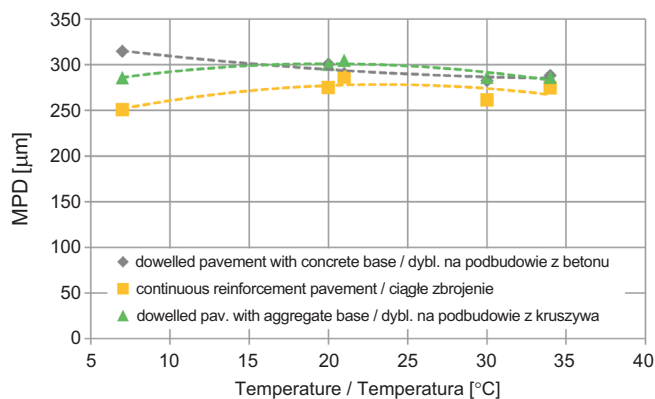


Fig. 9. Effect of temperature on MPD (motorway A4, transverse tining, right lane, northbound carriageway)

Rys. 9. Wpływ temperatury na MPD (autostrada A4, szotkowanie poprzeczne, pas prawy, jezdnia północna)

Podobne spostrzeżenia (mała wrażliwość) dotyczące oddziaływania temperatury na wyniki badanych parametrów stwierdzono na autostradzie A2 oraz drodze ekspresowej S8 wykonanych w technologii „odkrytego kruszywa”.

Większość analizowanych nawierzchni betonowych została zbudowana w technologii ze szczelinami poprzecznymi. Zrealizowano jednak odcinki w technologii bezdylatacyjnej jako nawierzchnie betonowe o ciągłym zbrojeniu. Do nich należą odcinek A4 na jezdni północnej km 133+975 - 134+860 oraz odcinek A2 na jezdni północnej km 1+000 - 2+000. Powszechnie uważa się [4], 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 poziomu hałasu wewnątrz pojazdu. Druga sytuacja dotyczy zbyt dużej szerokości szczeliny oraz jej jakości wypełnienia. Im szersza i gorzej utrzymana szczelina, tym większy poziom hałasu.

Pierwszej analizie poddano trzy typy konstrukcji nawierzchni na autostradzie A4. Odniesienie wyników do nawierzchni bezdylatacyjnej stanowiły dwa pozostałe odcinki znajdujące się na tej samej jezdni z dylatacjami o innych konstrukcjach podbudowy. Na podstawie analizy porównawczej trzech typów nawierzchni (Rys. 10) stwierdzono, że nawierzchnia o ciągłym zbrojeniu ma najmniejszą wartość wskaźnika IRI.

Similar observations about the effect of temperature on the investigated parameters (their low sensitivity to temperature) were made for aggregate motorway A2 and expressway S8 with the exposed aggregate finish.

Most of the investigated concrete pavements had transverse joints. But there were also jointless stretches of continuously reinforced pavement, e.g. the stretch of the northbound carriageway of A4 at the 133+975 - 134+860 km and the stretch of the northbound carriageway of A2 at the 1+000 - 2+000 km. It is commonly agreed [4] that the transverse joints between the slabs can contribute to a general increase in the noise level in two cases. In the first case, there is no sufficient load transfer between the slabs and consequently vehicle tyres produce knocks in the joints when hitting the protruding slab edge. When the slab drop-offs exceed 4-5 mm, the knocking can be quite load and annoying, particularly inside vehicles. In the second case, the joints are too wide and poorly filled. The wider the joint and the poorer its condition, the higher the noise level. First three types of pavement structure on motorway A4, i.e. a reference stretch of jointless continuously reinforced pavement and two stretches of jointed pavement differing in their base structure, were analysed. The comparative analysis of the three types of pavement (Fig. 10) showed that the continuously reinforced pavement had the lowest IRI.

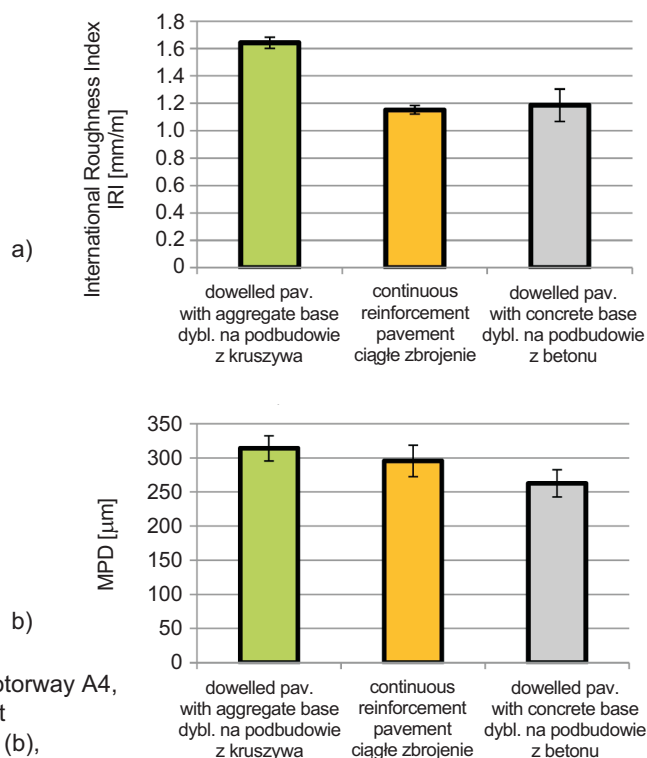


Fig. 10. Comparison of averaged values of IRI (a) and MPD (b), motorway A4, transverse tining, northbound carriageway, three types of pavement

Rys. 10. Wyniki porównawcze uśrednionych wartości IRI (a) i MPD (b), autostrada A4, szotkowanie poprzeczne, jezdnia północna, trzy typy konstrukcji

Na autostradzie A2 występują dwa typy konstrukcji. Nawierzchnia bezdylatacyjna znajduje się na jezdni północnej, natomiast nawierzchnia ze szczelinami na podbudowie z betonu na jezdni południowej. Na autostradzie A2 nie stwierdzono wyraźnego zróżnicowania wyników dla tekstury MPD. Wskazano jednak mniejsze wartości wskaźnika IRI dla nawierzchni bezdylatacyjnej o ciągłym zbrojeniu w stosunku do wartości uzyskanych dla nawierzchni ze szczelinami (Rys. 11).

On motorway A2 there are two types of pavement structure: 1) a jointless pavement on the northbound carriageway and 2) a jointed pavement with a concrete base on the southbound carriageway. No significant difference in the MPD values between the two pavement structures was found. But the IRI values for the jointless pavement were lower than for the jointed one (Fig. 11).

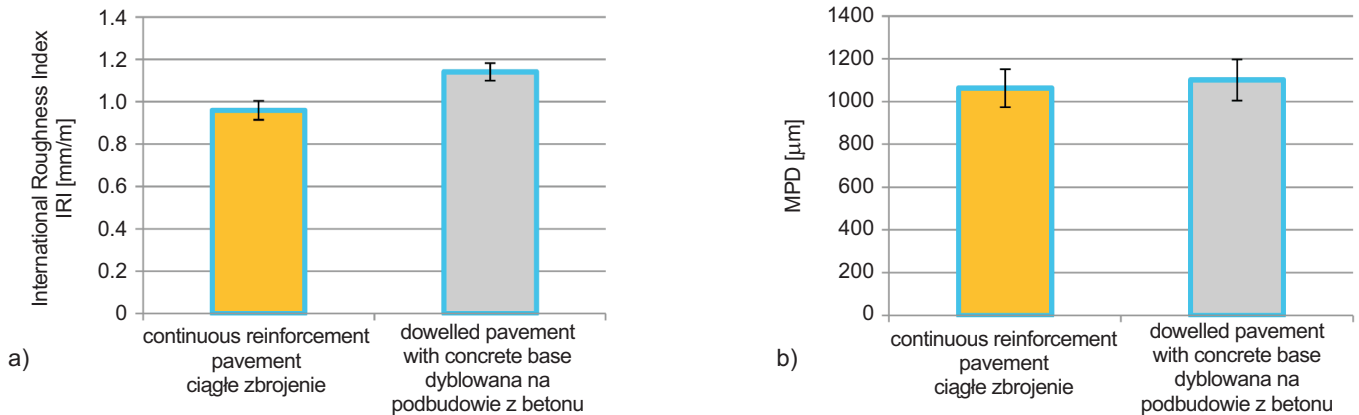


Fig. 11. Comparison of averaged values of IRI (a) and MPD (b), motorway A2, exposed aggregate finish, northbound carriageway and southbound carriageway

Rys. 11. Wyniki porównawcze uśrednionych wartości IRI (a) i MPD (b), autostrada A2, „odkryte kruszywo”, jezdnia północna i południowa

W dalszej części artykułu skupiono uwagę na ocenie równości nawierzchni betonowych na podstawie wskaźnika IRI. Spośród badanych 3 odcinków nawierzchni A4 największe wartości wskaźnika IRI uzyskano dla nawierzchni na podbudowie z kruszywa (około 1,6 mm/m) (Rys. 10a). Najmniejsze wartości IRI występują na nawierzchni o ciągłym zbrojeniu (około 1,2 mm/m). Dla tej konstrukcji uzyskano także najniższą wartość odchylenia standardowego (0,02 mm/m). Największe wahania wyników uzyskano dla nawierzchni na podbudowie z betonu. Ten typ nawierzchni występuje zarówno na jezdni północnej jak i południowej. Różnica okresów eksploatacji tych jezdni wynosi 5 lat. W związku z tym uzasadniona jest różnica w równościach sięgająca 30%. Na Rys. 12 zaprezentowano wyniki wykonanych pomiarów tylko w przypadku nawierzchni na podbudowie z betonu występującej na obu jezdniach.

Nawierzchnię drogi ekspresowej S8 poddano dalszej analizie. Na tej drodze wykonano odcinki w technologii odkrytego kruszywa na podbudowie z betonu. Rys. 13 pokazuje wyniki osiągnięte w różnych dniach oraz na różnych pasach ruchu. Dla pasów prawych uzyskano większe wartości wskaźnika IRI (1,3 mm/m) niż na pasach lewych (1,1 mm/m). Dla obu pasów uzyskano zbliżone wartości odchylenia standardowe-

Below, attention is focused on the roughness of the concrete pavements, evaluated on the basis the IRI values. As regards the three investigated pavement stretches of motorway A4 the highest IRI values (about 1.6 mm/m) were obtained for the pavement with the aggregate base (Fig. 10a). The lowest IRI values (about 1.2 mm/m) characterize the continuously reinforced pavement. Also the lowest standard deviation (0.02 mm/m) was obtained for this pavement structure. The results vary most widely for the pavement on the concrete base. This type of pavement occurs on both the northbound carriageway and the southbound carriageway. The difference in in-service time between the carriageways amounts to 5 years. Thus the difference in roughness amounting to 30% is justified. Fig. 12 shows the measurement results for only the pavement with the concrete base, which occurs on both the carriageways.

Then the pavement of expressway S8 was analysed. This road has stretches of pavement with the exposed aggregate finish. The measurement results for different days and different traffic lanes are presented in Fig. 13. Higher IRI values (1.3 mm/m) were registered for the right lanes than for the left ones (1.1 mm/m). Similar standard deviation

go 0,1 mm/m. Warto zaznaczyć, że okres eksploatacji tego odcinka wynosi zaledwie 2 lata, a różnica w równościach świadczy o znacznym zróżnicowaniu struktury i natężenia ruchu na obu pasach. Stosunkowo duże zróżnicowanie wyników (duże odchylenia standardowe) uzyskano dla pomiarów wskaźnika IRI na odcinku A4 w km 51+400 - 62+300. Nawierzchnia tej drogi ma teksturę podłużną oraz ponad dwudziestoletni okres eksploatacji, jednak jak wskazują wyniki, wartości wskaźnika IRI są mniejsze niż 2 mm co pozwala sklasyfikować tę nawierzchnię do klasy A wg DSN (Rys. 14).

values (0.1 mm/m) were obtained for the two lanes. It should be noted that this stretch had been in service for only two years and the difference between the roughness values indicates a considerable difference in traffic composition and volume between the two lanes. The IRI values measured for the stretch located at the 51+400 - 62+300 km on A4 varied considerably (the standard deviation was high). This road pavement has a longitudinal texture and had been in service for over 20 years, but the measured IRI values are below 2 mm and so the pavement can be classified as belonging to class A acc. to DSN (Fig. 14).

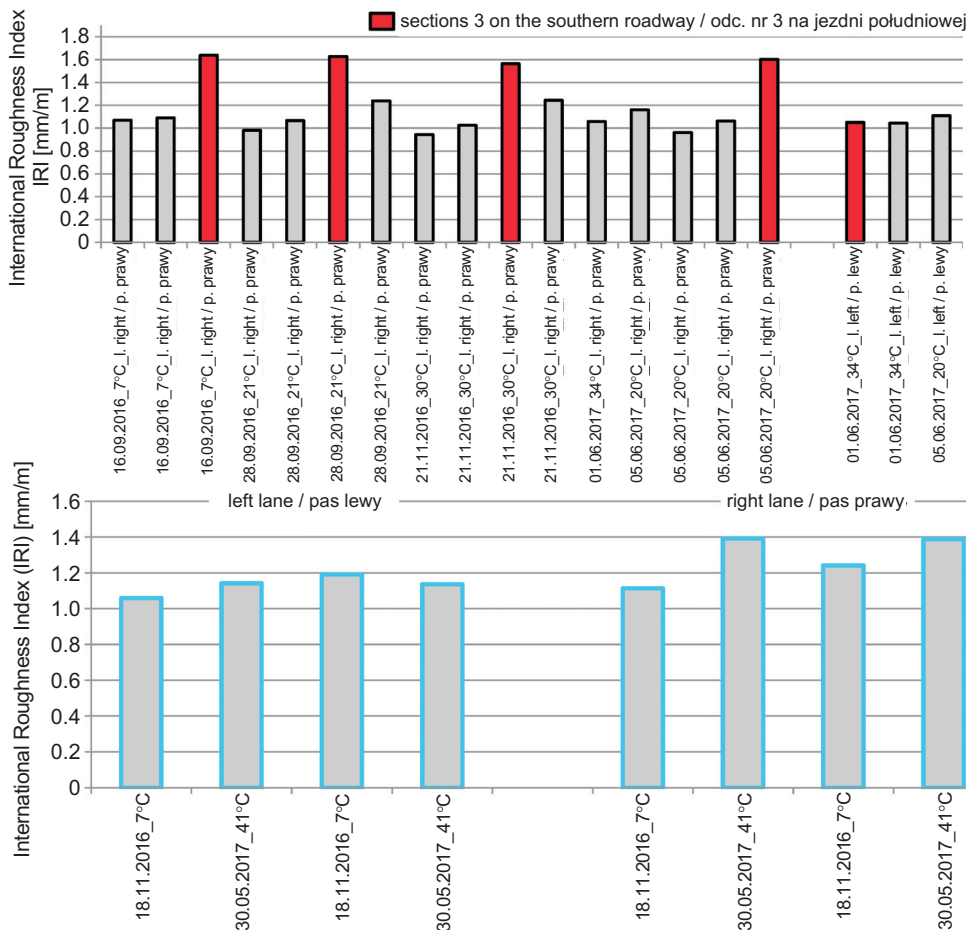


Fig. 12. IRI values for pavement on motorway A4 (pavement structure with concrete base, stretch on southbound carriageway is marked red)
Rys. 12. Wyniki wskaźnika IRI dla nawierzchni na A4 (konstrukcja na podbudowie z betonu, na czerwono oznaczono odcinek na jezdni południowej)

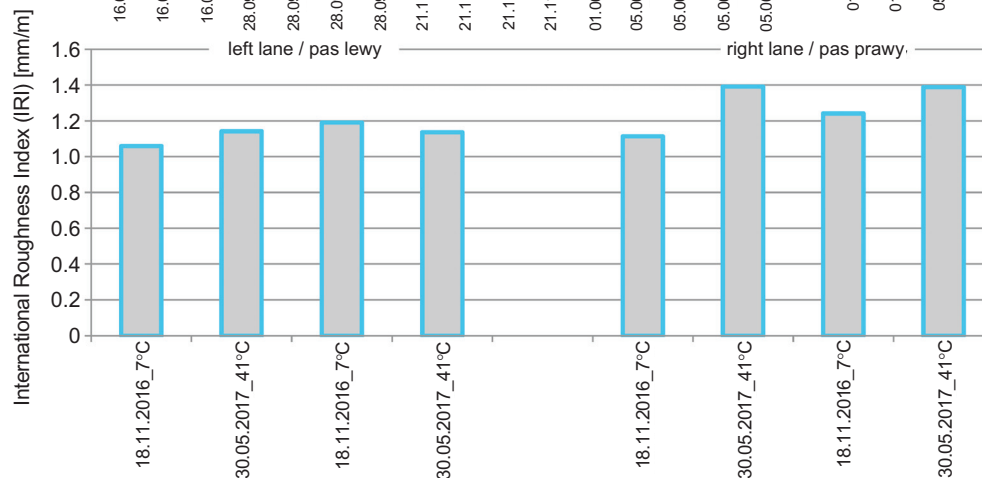


Fig. 13. IRI values for pavements on S8 (exposed aggregate finish, pavement structure with concrete base).
Rys. 13. Wyniki wskaźnika IRI dla nawierzchni na S8 („odkryte kruszywo”, konstrukcja na podbudowie z betonu)

Niewątpliwie największe wartości nierówności podłużnej otrzymano na starej wyeksploatowanej autostradzie A18 (ponad 80-letniej). Uzyskano wyższe wartości wskaźnika IRI na pasie prawym (7,1 mm/m) niż na lewym (5,3 mm/m). Warto zauważyć, że dla obu pasów występują także duże odchylenia standardowe, świadczące o znacznym zróżnicowaniu wyników (Rys. 15). Klasyfikacja tego odcinka wg DSN wynosi D. Istotny wpływ na takie wyniki mają duże uszkodzenia szczelin oraz przemieszczenia płyt względem siebie (brak dybli).

Clearly, the highest longitudinal roughness values were obtained for the old (over 80 years old), heavily deteriorated motorway A18. Higher IRI values were measured on the right lane (7.1 mm/m) than on the left lane (5.3 mm/m). It should be noted that large standard deviations, indicative of a large scatter of the results, were obtained for the two lanes (Fig. 15). According to DSN, this stretch is classified as D. The badly damaged joints and the slabs displaced relative to one another (missing dowels) significantly contributed to such results.

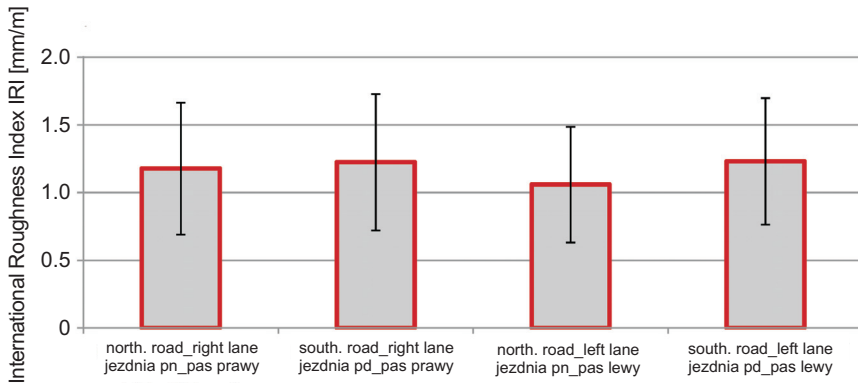


Fig. 14. IRI values for pavement (at 51+400 - 62+300 km) on A4, longitudinal texture

Rys. 14. Wyniki wartości wskaźnika IRI w przypadku nawierzchni na A4 (km 51+400 - 62+300), tekstura podłużna

Na Rys. 16 zestawiono porównanie wskaźnika IRI dla wybranych badanych nawierzchni z uwzględnieniem tekstury. Zestawione wyniki dotyczą prawych, najbardziej obciążonych ruchem pasów ruchu. Nie prezentowano wyników z A18 ze względu na starą, nie stosowaną już technologię oraz znacznie zdegradowaną nawierzchnię. Warto zauważyć, że nie tylko nawierzchnie o ciągłym zbrojeniu mają najniższe wartości wskaźnika IRI (około 1,1 mm/m) ale także wybrana konstrukcja na podbudowie z betonu na A2. Największe nierówności występują na A4 na konstrukcji z podbudową z kruszywa (około 1,5 - 1,6 mm/m). Można stwierdzić, że rodzaj konstrukcji wpływa istotnie na równość podłużną, niezależnie od technologii wykończenia nawierzchni. Jak przedstawiono wcześniej na Rys. 10b oraz Rys. 11b nie stwierdzono wyraźnego wpływu typu konstrukcji na wskaźnik MPD.

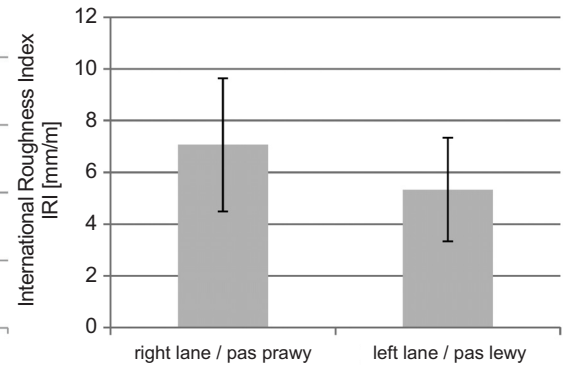


Fig. 15. IRI values for pavement on A18

Rys. 15. Wyniki wartości wskaźnika IRI w przypadku nawierzchni na A18

The IRI values for selected investigated pavements with their texture taken into account are compared in Fig. 16. The compared results are for the right lanes, most heavily loaded with traffic. The results for A18 are not included in the comparison because of the obsolete technology used to build this motorway, and its much degraded pavement. It should be noted that not only the continuously reinforced pavements have the lowest IRI values (about 1.1 mm/m), but also the selected pavement structure with the concrete base on A2. The largest roughness (1.5-1.6 mm/m) characterizes the pavement structure with the aggregate base. It is clear that the type of pavement structure has a significant bearing on longitudinal roughness, regardless of the pavement finish technology. As earlier shown in Fig. 10b and Fig. 11b, no distinct influence of the type of pavement structure on MPD was observed.

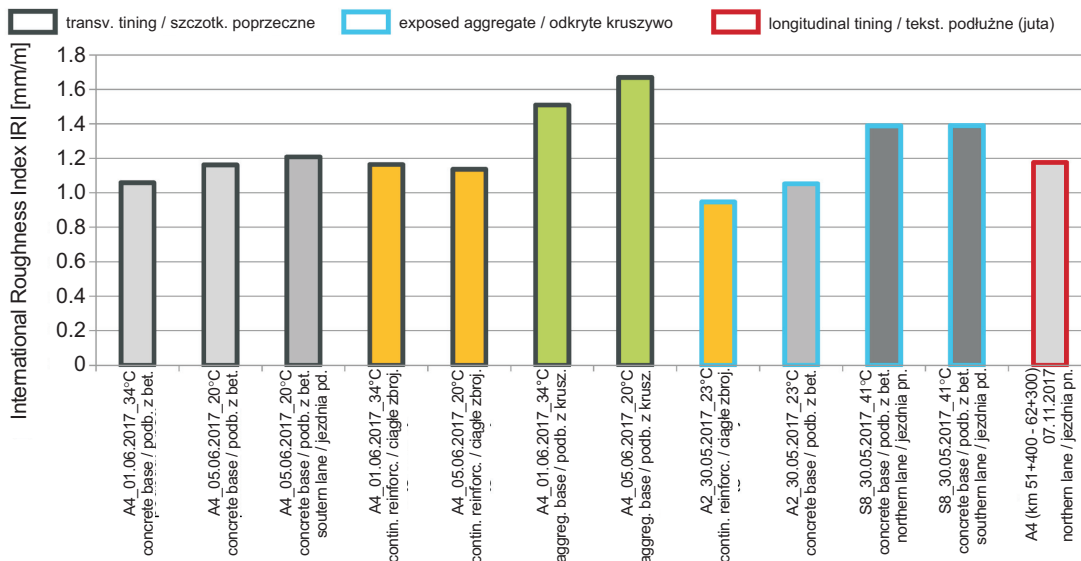


Fig. 16. Averaged IRI values for selected concrete pavements
Rys. 16. Wyniki uśrednionych wartości wskaźnika IRI w przypadku wybranych nawierzchni betonowych

Na Rys. 17 zestawiono porównanie tego wskaźnika dla wszystkich badanych nawierzchni z uwzględnieniem sposobu wykończenia. 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) wykonany w technologii teksturowania podłużnego (ciągniona juta). Natomiast w drugiej grupie znajdują się nawierzchnie na A2 i S8 wykonane w technologii „odkrytego kruszywa”.

Zidentyfikowano największą wartość tekstury na stosunkowo młodych, dwuletnich odcinkach S8 oraz pięcioletnich na A2 wykonanych w technologii odkrytego kruszywa (około 1000 μm). Najmniejsze wartości uzyskano na przeszło 15-letniej A4, na której stosowano na powierzchni szrotkowanie poprzeczne (około 300 μm). Nieco większe dla tekstury podłużnej (około 400 μm). Należy jednocześnie zaznaczyć, że badane nawierzchnie mają różne okresy oddania do użytku: A4 j. północna – 2005 rok, A4 j. południowa – 2000 rok, A2 – 2012 rok, S8 – 2015 rok. Zmiany wskaźnika tekstury MPD w zależności od roku oddania nawierzchni do eksploatacji pokazano na Rys. 18 (nie zamieszczano wyników dla A18 z 1933 r.). Nie stwierdzono takiej korelacji dla wskaźnika równości IRI, a także dla innych parametrów rejestrowanych w urzędzeniu RSP.

Fig. 17 shows a comparison of MPD values for all the tested pavements with the type of surface finish taken into account. It should be noted that the motorway A4 pavements with the transverse tining finish texture and the stretch (51+400 - 62+300 km) on A4, with the longitudinal burlap dragging texture are in the same group of results. The pavements on A2 and S8, built using the exposed aggregate technology, are in the other group.

The highest texture value (about 1000 μm) was registered on the relatively new (two year old) stretches of S8 and on the five year old stretches with the exposed aggregate finish on A2. The lowest texture values were registered on the over fifteen year old motorway A4 with the transverse finish tining (about 300 μm). Slightly higher values were registered for the longitudinal texture (about 400 μm). But it should be noted that the tested pavements had been put in service in different years: A4 northbound carriageway – 2005, A4 southbound carriageway – 2000, A2 – 2012, S8 – 2015. MPD values depending on the coming-into-service year are presented in Fig. 18 (the results for A18 for 1933 are not included). No such correlation was observed for IRI and the other parameters registered by the road surface profiler (RSP).

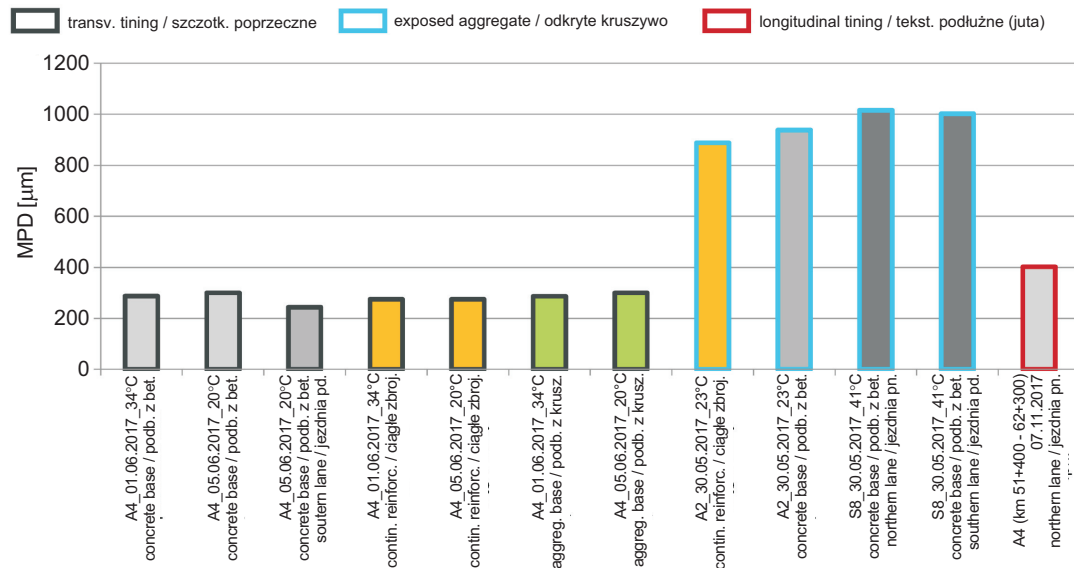


Fig. 17. Averaged MPD values for selected concrete pavements Rys. 17. Wyniki uśrednionych wartości wskaźnika MPD w przypadku wybranych nawierzchni betonowych

Zestawienie wartości uśrednionych IRI oraz MPD dla trzech sposobów wykończenia górnej powierzchni przedstawia Rys. 19. Należy zauważyć, że 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 kilku-

Averaged IRI and MPD values for the three types of top surface finish are presented in Fig. 19. It should be noted that almost four times higher MPD values were obtained for the exposed aggregate technology than for transverse tining. The transversely tined texture (made ten-twenty years ago) quickly deteriorated, much more than the longitudinally tined (by burlap dragging) texture (being in

nastu lat) szybko uległa pogorszeniu, zdecydowanie bardziej niż teksturuwanie podłużne z wykorzystaniem maty jutowej (20 lat eksploatacji). Oczywiście różnice mogą być także związane ze znacznie zróżnicowanym natężeniem ruchu, dokładnością wykonania, rodzajem materiału (betonu, kruszywa).

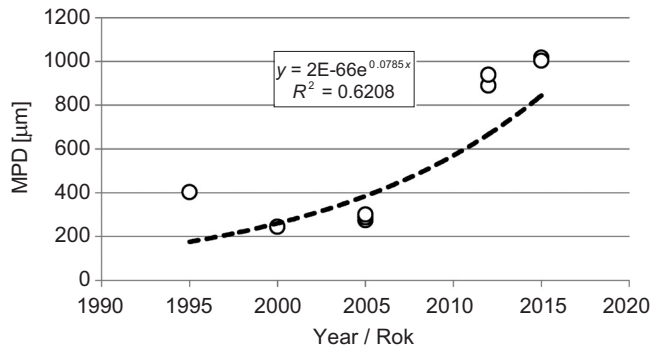


Fig. 18. MPD values depending on pavement coming-into-service year

Rys. 18. Zmiany wskaźnika tekstury MPD w zależności od roku oddania nawierzchni do eksploatacji

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analiza wyników badań nad parametrami charakteryzującymi powierzchnię nawierzchni (równość, tekstura) wykazała, że największa niejednorodność w mierzonych wielkościach występuje na autostradzie A4 z powodu różnych typów nawierzchni oraz występowania obiektów inżynierskich. Stwierdzono, że temperatura nie ma istotnego wpływu na identyfikowane parametry IRI oraz MPD. Stwierdzono nieznaczny wpływ temperatury na wartość równości poprzecznej ze zróżnicowaniem ze względu na typ konstrukcji (uzyskano najmniejsze wartości dla konstrukcji zbrojonej tj. bez szczelin poprzecznych, największe dla dyblowanej ze szczelinami poprzecznymi na kruszywie). Dalsza analiza dotycząca wpływu typu konstrukcji w technologii bezdylatacyjnej wykazała, że nawierzchnie bezdylatacyjne charakteryzują się większą równością w stosunku do nawierzchni wykonanych w klasycznej technologii ze szczelinami. Największą wartość wskaźnika IRI (świadczącej o nierówności podłużnej) uzyskano w przypadku nawierzchni na podbudowie z kruszywa. Nie stwierdzono wpływu czasu eksploatacji na równość badanych nawierzchni betonowych. Istnieje jednak dobra korelacja zmiany wskaźnika tekstury MPD z czasem oddania nawierzchni do eksploatacji. Stwierdzono najlepsze parametry tekstury dla stosunkowo „młodych” nawierzchni autostrady A2 i drogi S8 wykonanych w technologii „odkrytego kruszywa”.

service for 20 years). Naturally, the differences can also be due to different traffic densities, construction tolerances and the type of material (concrete, aggregate).

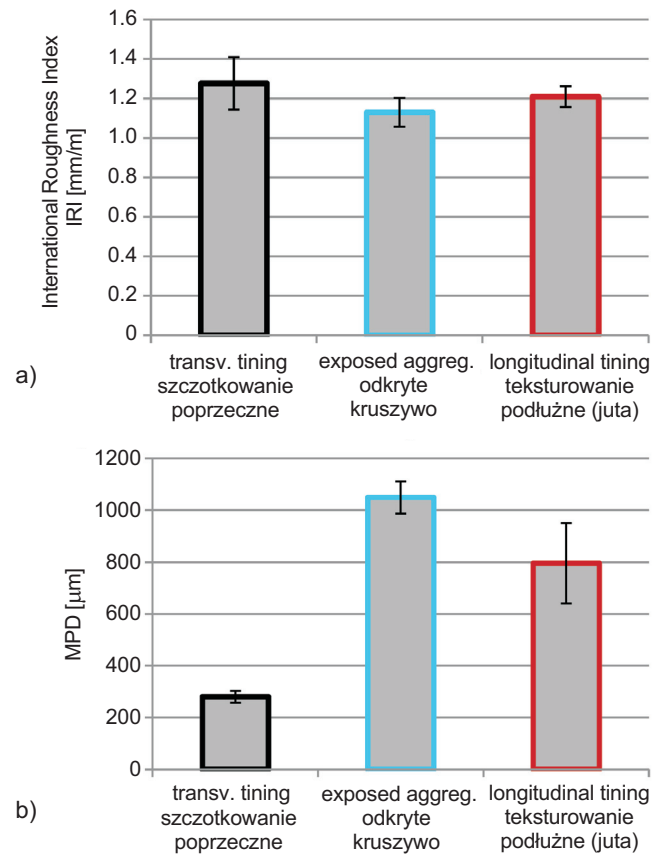


Fig. 19. Comparison of averaged IRI (a) and MPD (b) values for three types of top surface finish

Rys. 19. Wyniki porównawcze uśrednionych wartości IRI (a) i MPD (b) dla trzech sposobów wykończenia górnej powierzchni

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The analysis of the pavement surface roughness and texture test results showed that the greatest variation in the measured quantities occurs on motorway A4. This is because of the different types of pavement and civil engineering structures present there. Temperature was found to have no effect on the registered IRI and MPD values. It was found to influence slightly transverse roughness values, to a degree depending on the type of pavement structure: the lowest values were registered for the continuously reinforced pavements (without transverse joints) while the highest values were measured for the dowelled transverse jointed pavement structure with the aggregate base. Further analyses showed that the jointless pavements were

Odmiennej ocenie podlega nawierzchnia betonowa na autostradzie A18. Stara, nie stosowana już technologia budowy oraz długi okres eksploatacji przyczyniły się do powstania znacznych uszkodzeń w szczelinach i nierówności w profilu podłużnym.

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy ich wyników wysunięto następujące wnioski:

1. Proponuje się uwzględniać w procedurze pomiarowej równości i tekstury: wskaźnik IRI w śladzie prawego koła oraz wskaźnik MPD w śladzie prawego koła. Te parametry dobrze charakteryzują różne typy konstrukcji nawierzchni oraz klasyfikują je ze względu na sposób wykończenia górnej powierzchni, w tym także ze względu na czas eksploatacji.
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. Istotny jest jednak ciągły monitoring stanu eksploatacyjnego tego typu nawierzchni także w dłuższym czasie eksploatacji.
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 czasu eksploatacji.

INFORMACJE DODATKOWE

Wybrane elementy niniejszego artykułu zrealizowano w ramach przedsięwzięcia „RID” (Ochrona przed hałasem drogowym) współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Farnsworth E., Johnson M.*: Reduction of Wet Pavement Accidents on Los Angeles Metropolitan Freeways, SAE Technical Paper 710574, 1971
- [2] *Hibbs O., Larson R.*: Tire Pavement Noise and Safety Performance. PCC Surface Texture Technical Working Group, FHWA-SA-96-068, May, 1996
- [3] Noise and Texture on PCC Pavements - Results of a Multi-State Study. Report Number WI/SPR-08-99, Wisconsin Department of Transportation, June, 2000
- [4] *Scofield L.*: Transportation Noise and Concrete Pavements, Using Quiet Concrete Pavements as the Noise Solution, ACPA, 2009
- [5] Development and Implementation of the Next Generation Concrete Surface, IGGA, ACPA, Report, 2016

characterized by greater smoothness than the conventional pavements with joints. The highest IRI value (indicating longitudinal roughness) was registered for the pavement with the aggregate base. The length of time for which the investigated concrete pavements had been in service was found to have no significant effect on their roughness. However, there is a good correlation between MPD and the year in which the pavement came into service. The relatively new pavements with the exposed aggregate finish on motorway A2 and expressway S8 were found to be characterized by the best texture parameters.

The concrete pavement on motorway A18 is a separate case: its obsolete construction technology and old age contributed to considerable damage in the joints and to roughness in the longitudinal profile.

The following conclusions were drawn from the investigations and the analysis of their results:

1. In the roughness and texture measurement procedure it is proposed to take into account: IRI in the right wheel track and MPD in the right wheel track. These parameters characterize well the different types of pavement structure and classify them depending on the top surface finish and also on the in-service time.
2. The exposed aggregate finish technology used in Poland and in other European countries ensures good surface characteristics for concrete pavements. However, the condition of such pavements needs to be monitored over a longer time of their service life.
3. Continuously reinforced concrete pavements should be designed to carry very heavy traffic since they are characterized by good smoothness regardless of their surface finish and in-service time.

ACKNOWLEDGEMENT

Some components of this research work were done as part of the RID (Protection against road noise) project co-funded by the National Centre for Research and Development and the General Directorate for National Roads and Motorways.

- [6] *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
- [7] *Anderson K., Sexton T., Uhlmeier J., Russell M., Weston J.*: Concrete Pavement Noise, WA-RD 814.1, WSDOT Research Report, July, 2013

- [8] *Harvey J.T., Kohler E.*: Quieter Pavement Research: Concrete Pavement Tire Noise, Research Report: UCPRC-RR-2010-03, May, 2011
- [9] *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
- [10] *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
- [11] *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
- [12] *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
- [13] *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
- [14] American Concrete Pavement Association, Concrete Paving Technology: Constructing Smooth Concrete Pavements, Report RB006P, 2003
- [15] *Grogg M.G., Smith K.D.*: PCC Pavement Smoothness: Characteristics and Best Practices for Construction, Report FHWA-IF-02-025, October, 2001
- [16] *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
- [17] Surface Texture for Asphalt and Concrete Pavements. Federal Highway Administration, Technical Advisory T 5040.36, 17 June, 2005
- [18] ASTM International, Standard Test Method for Measuring Pavement Macrottexture Depth using a Volumetric Technique, Specification E965-96, 2001
- [19] ASTM E 2157-02 Standard method for determining Mean Profile Depth using the Circular Track Meter. www.astm.org. Assessed 5/30/2009
- [20] *Karamihas S.M., Gillespie T.D., Perera R.W., Kohn S.D.*: Diurnal changes in profile of eleven jointed PCC pavement. Proceedings of The 7th International Conference on Concrete Pavements, Orlando, FL., 2001
- [21] *Hall J.W., Smith K.L.*: Littleton Texturing of Concrete Pavements, NCHRP report 634
- [22] *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
- [23] *McNerney M.T., et al.*: Comparative Field Measurements of Tire Pavement Noise of Selected Texas Pavement, Center of Transportation Research: Austin, TX, 1997
- [24] *Graf R.A.G., et al.*: Horn Amplification at a Tyre/Road Interface - Part I: Experiment and Computation, Internoise: Fort Lauderdale, FL, 1999
- [25] *Sandberg U., Ejsmont J.A.*: Influence of tyre rubber hardness on tyre/road noise emission. 36th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, Turkish Acoustical Society INTER-NOISE, 2007, Istanbul, 1, 394-403
- [26] *Ejsmont J.A., Ronowski G., Świeczko-Żurek B., Sommer S.*: Road texture influence on tyre rolling resistance. Road Materials and Pavement Design, **18**, 1, 2017, 181-198
- [27] *Taryma S., Ejsmont J.A., Ronowski G., Świeczko-Żurek B., Mioduszewski P., Drywa M., Woźniak R.*: Road texture influence on tire rolling resistance. Key Engineering Materials, **597**, 2014, 193-198
- [28] *Ejsmont J., Taryma S., Ronowski G., Świeczko-Żurek B.*: Influence of temperature on the tyre rolling resistance. International Journal of Automotive Technology, **19**, 1, 2018, 45-54
- [29] *Wasilewska M., Gardziejczyk W.*: Analiza ilościowa i jakościowa zmian mikroteksturalnych powierzchni kruszywa stosowanego do warstwy ścieralnej. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, **59**, 3/IV, 2012, 361-368
- [30] *Wasilewska M.*: Polishing resistance of aggregates in aspect of its usage to wearing course road pavements. Prace Naukowe Instytutu Gornictwa Politechniki Wrocławskiej, **134**, 2012, 301-310
- [31] *Wasilewska M., Gardziejczyk W., Gierasimiuk P.*: Evaluation of skid resistance of exposed aggregate concrete pavement in the initial exploitation period. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **16**, 4, 2017, 295-308
- [32] *Gardziejczyk W., Wasilewska M.*: Evaluation of microtexture changes of coarse aggregate during simulated polishing. Archives of Civil Engineering, **62**, 2, 2016, 19-34
- [33] *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

- [34] *Sommer H.*: Optimierung der Lärmindernden Waschbeton-oberfläche (Optimisation of Noise Reducing Exposed Aggregate Concrete Surfaces), Vienna (Austria): State Ministry for Economic Affairs, File 447, 1995
- [35] *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
- [36] *Gardziejczyk W.*: „Cicha” nawierzchnia drogowa jako sposób na ograniczenie poziomu hałasu od ruchu samochodowego. *Inżynieria Ekologiczna*, **40**, 2014, 65-73
- [37] *Mioduszewski P.*: Przegląd hałaśliwości nawierzchni drogowych w Polsce i w innych krajach Unii Europejskiej. *Metody ochrony przed hałasem. Teoria i praktyka*, **1**, 2013, 159-173
- [38] *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)
- [39] ASTM E 1926 - 08 Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements
- [40] PN-EN ISO 13473-1:2005E Charakterystyka struktury nawierzchni przy użyciu profili powierzchniowych
- [41] Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 16 stycznia 2002 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących autostrad płatnych. Część 1: Określenie średniego profilu głębokości
- [42] Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów. Wytyczne stosowania. GDDKiA, Warszawa, kwiecień 2015 r.