

MARCIN BŁASZCZAK¹⁾KAROL J. KOWALSKI²⁾JAN KRÓL³⁾

FRICITION COEFFICIENT, TEXTURE DEPTH AND TYRE/ROAD NOISE EVALUATION METHOD BY ANALYSIS OF TYRE PRINT IMAGE

METODA OCENY WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA, GŁĘBOKOŚCI MAKROTEKSTURY I POZIOMU DŹWIĘKU ZA POMOCĄ ANALIZY OBRAZU POLA KONTAKTU OPONY Z NAWIERZCHNIĄ

STRESZCZENIE. Rozwój sieci drogowej wymaga intensywnych prac badawczych w zakresie utrzymania i eksploatacji dróg. Istotne jest opracowanie wydajnych i skutecznych metod oceny stanu nawierzchni. Monitorowanie poziomu cech związanych z bezpieczeństwem ruchu drogowego (współczynnika tarcia oraz głębokości tekstury) jest szczególnie ważne dla użytkowników dróg, natomiast utrzymywanie hałasu drogowego na jak najniższym poziomie jest istotne ze względu na jakość życia ludności zamieszkującej w ich pobliżu. W artykule przedstawiono wyniki pracy badawczej, której celem było ustalenie, czy możliwe jest określenie właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni, jej „hałaśliwości” oraz głębokości tekstury na podstawie analizy pola kontaktu opony z nawierzchnią. Zaprezentowano autorską metodę analizy obrazu pola kontaktu opony z nawierzchnią. Ustalono zależności korelacyjne pomiędzy stosowanymi metodami badawczymi: głębokości profilu tekstury (MPD) profilografem laserowym, współczynnika tarcia przyczepką SRT-3 oraz hałasu drogowego (metoda CPX). Stwierdzono, że zachodzi korelacja pomiędzy zaproponowaną metodą a badaniami MPD oraz SRT-3 na wszystkich badanych rodzajach nawierzchni oraz z metodą CPX na nawierzchniach asfaltowych o strukturze zamkniętej.

SŁOWA KLUCZOWE: analiza obrazu, głębokość tekstury, nawierzchnia drogowa, właściwości przeciwpoślizgowe, współczynnik tarcia.

ABSTRACT. The development of road network requires intensive research in the field of road maintenance. It is essential to develop efficient and effective assessment methods of road pavement condition. Monitoring the level of the traffic safety-related characteristics (friction coefficient and texture depth) is particularly important for road users, while keeping road noise as low as possible is important because of the urban population living near them. The article presents the results of research work, the aim of which was to establish whether it is possible to determine skid resistance properties, pavement/tyre noise and texture depth by tyre prints on the basis of the analysis of tyre/pavement contact point. The paper presents an original method of the image analysis of tyre/pavement contact point. The correlation of this method with standard test methods, such as laser profilometer texture depth MPD, SRT-3 skid resistance tester and CPX road noise was investigated. As a result of this study it has been demonstrated that there is a significant correlation between the introduced method and MPD and SRT-3 methods for all tested pavement types as well as with CPX method for non-porous pavements.

KEYWORDS: friction coefficient, image analysis, resistance properties, road pavement, texture depth.

¹⁾ Wydział Ewidencji Dróg, Zarząd Dróg Miejskich, Warszawa; marcin.blaszczak88@gmail.com

²⁾ Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska; k.kowalski@il.pw.edu.pl (✉)

³⁾ Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska; j.krol@il.pw.edu.pl

1. WSTĘP

W ostatnich latach nastąpił w Polsce istotny rozwój sieci drogowej. Powstały autostrady oraz drogi ekspresowe, w wielu miastach zrealizowano liczne inwestycje drogowe mające na celu usprawnienie komunikacji. Zbudowane w ostatnich latach drogi w większości cechują się wysoką jakością wykonania. Dotyczy to trwałości konstrukcji nawierzchni oraz właściwości eksploatacyjnych, m.in. właściwości przeciwpoślizgowych, równości poprzecznej oraz podłużnej. Dla osób mieszkających w pobliżu dróg ogromne znaczenie ma także hałas drogowy. Właściwości nawierzchni dotyczą więc znacznej części społeczeństwa – kierowców, pasażerów oraz osób przebywających i pracujących w sąsiedztwie dróg samochodowych.

Stan nawierzchni drogowej ulega ciągłej degradacji pod wpływem oddziaływania ruchu samochodowego i czynników atmosferycznych. Administracja drogowa jest odpowiedzialna za ocenę stanu nawierzchni, na podstawie której podejmuje decyzję o niezbędnych zabiegach utrzymaniowych i remontowych. Utrzymywanie właściwości eksploatacyjnych nawierzchni na wysokim poziomie jest ważne ze względu na bezpieczeństwo ruchu drogowego. Tarcie powstające pomiędzy oponą a nawierzchnią jest głównym czynnikiem pozwalającym na utrzymanie właściwej prędkości zgodnej z torem jazdy pojazdu samochodowego. Dwoma głównymi składowymi tarcia są adhezja oraz histereza sprężysta. Pierwsza składowa jest zależna od adhezyjnego przylegania cząsteczek gumy opony samochodowej do nawierzchni drogowej, druga składowa jest energią sprężystą traconą w postaci ciepła podczas odkształcania się opony [1].

„Tekstura opisuje geometrię nierówności warstwy jezdnej nawierzchni. Tekstura nawierzchni drogowej zależy od składu materiału z którego jest wykonana oraz od technologii jej wbudowania.” [2]. Stwierdzono, że tekstura ma wpływ na właściwości eksploatacyjne nawierzchni [3, 4]. Hałas zewnętrzny związany jest z makroteksturą rzędu 10^{-3} m. Na współczynnik tarcia wpływ ma: makrotekstura wielkości 10^{-2} m oraz mikrotekstura wielkości 10^{-4} m. Mikrotekstura rzędu 10^{-6} m odpowiada za ścieranie opony. W przypadku nawierzchni mokrej szczególnie ważna jest również głębokość tekstury, decydująca o ryzyku wystąpienia zjawiska akwaplaningu. Współczynnik tarcia oraz tekstura nawierzchni są kluczowe w zapewnieniu bezpieczeństwa ruchu drogowego, dlatego istotne jest ich monitorowanie. Zasadne wydaje się prowadzenie działań, których celem jest opracowanie skutecznych, prostych, łatwo dostępnych i tanich metod badawczych pozwalających kontrolować te właściwości.

1. INTRODUCTION

In recent years there has been significant growth of the road network in Poland. Motorways and highways were built, in many cities a number of road projects designed to improve transportation were implemented. The majority of roads built in recent years are of high quality. This applies to the sustainability of the pavement structure and performance characteristics, inter alia anti-skid properties, transverse and longitudinal equality. For the people living in the vicinity of roads the road noise is also of great importance. Pavement properties affect drivers, passengers and people residing and working in the proximity of motorways.

The road pavement condition is constantly degraded under the influence of the traffic and weather factors. The road administration is responsible for assessing the road pavement condition, on the basis of which it decides on the necessary maintenance and repair procedures. Maintaining the operating properties of the road pavement at a high level is important for road safety. The friction generated between the tyre and the road pavement is the major factor in maintaining the right speed compatible with a motor vehicle trajectory. The two main components of the friction are adhesion and elastic hysteresis. The first component is dependent on the adhesive adherence of the molecules of a car tyre rubber to road pavement. The second component is an elastic energy lost as heat during deformation of a tyre [1].

“The texture describes the geometry of the pavement course roughness. The road pavement texture depends on the composition of the material of which it is made and on the technology of its construction.” [2] It has been stated that the texture affects the performance characteristics of the pavement [3, 4]. Exterior noise is associated with a macrotecture of 10^{-3} m. The friction coefficient is affected by: the macrotecture of 10^{-2} m and microtexture of 10^{-4} m. The microtexture of 10^{-6} m is responsible for the tyre wear. In the case of a wet pavement the texture depth is particularly important as it is critical to the risk of the occurrence of an aquaplaning phenomenon. The friction coefficient and the texture of the pavement are essential in ensuring road safety. Thus, it is important to monitor them. It seems reasonable to conduct activities aimed at developing effective, simple, readily available and inexpensive test methods that allow better control of these properties.

Mechanizm powstawania hałasu drogowego jest złożony i związany m.in. z ruchem powietrza wokół poruszającego się pojazdu, dźwiękiem wydawanym przez układ napędowy i jezdnym pojazdu oraz hałasem powstającym w obszarze kontaktu ogumienia z nawierzchnią [5, 6]. W artykule przedstawiono głównie zagadnienia związane z turbulencjami i sprężaniem powietrza przez oponę pojazdu samochodowego oraz z jej drganiami w odniesieniu do hałasu generowanego na styku opona/nawierzchnia. Obecnie w Polsce, według Rozporządzenia Dz.U. 1999 nr 43 poz. 430, badanie współczynnika tarcia wykonuje się w dwa miesiące po otwarciu odcinka drogi, a uzyskane wartości powinny spełniać określone wymagania. Najczęściej stosowana w Polsce jest metoda SRT-3 Instytutu Badawczego Dróg i Mostów (IBDiM), według której pomiaru dokonuje się za pomocą przyczepy przy zablokowanym kole [7]. Rozporządzenie nie określa konkretnej metody badawczej, wymagając jedynie sprawdzonej korelacji ze współczynnikiem tarcia opony bezbieżnikowej rozmiaru 5,60S × 13 przy pełnym poślizgu. Do określenia średniej głębokości profilu tekstury *mean profile depth* (MPD) stosuje się m.in. metodę profilografu laserowego według PN-EN ISO 13473-5:2010E lub metody objętościowe (np. piasku kalibrowanego) według PN-EN 13036-1:2010 (powszechnie stosowaną w Polsce przy odbiorach nawierzchni). Wykonywane były prace nad zastosowaniem metody fotogrametrycznej do określania wybranych cech eksploatacyjnych nawierzchni drogowych [8].

Metody badawcze hałasu drogowego podzielić można na dwie grupy: metody oddalone, np. statystycznego przejazdu (*statistical pass-by* SPB) (ISO 11819-1), polegająca na pomiarze poziomu hałasu w oddaleniu (z pobocza drogi według szczegółowych wytycznych normowych) oraz metody bliskiego pola, np. przyczepkowa (*close proximity trailer* CPX) (ISO 11819-2), mierząca poziom hałasu powstającego na styku opony z nawierzchnią wewnątrz akustycznie odizolowanej przyczepy pomiarowej. Diagnostyka nawierzchni oraz pomiary cech eksploatacyjnych stanowiły podstawę szeregu krajowych i zagranicznych prac badawczych. Zmiany cech nawierzchni (także o strukturze otwartej) w trakcie ich użytkowania zostały przedstawione m.in. w pracy [9], a ich wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego oraz skuteczny monitoring na poziomie systemowym jest przedmiotem pracy [10]. Najważniejsze różnice pomiędzy typami nawierzchni oraz ich charakterystykę zawarto w publikacji [11], a szczegółowo opisują je: w zakresie hałasu drogowego [5] i współczynnika tarcia [1] oraz [12]. Metodyka analizy obrazu jest przedstawiona w publikacji [13].

The mechanism of the road noise generation is complex and related, among others, to the movement of air around a moving vehicle, to the sound issued by its drive system, wheels and suspension system, as well as to the noise arising in the area of tyre contact with the road pavement [5, 6]. This paper presents mainly issues related to turbulence and air compression by a tyre of a motor vehicle and its vibration with respect to the noise generated at the tyre/pavement contact. Currently in Poland, according to the Regulation OJ 1999 No. 43, item 430, the friction coefficient tests are carried out two months after the opening of a road section, and the obtained values should meet certain requirements. The most commonly applied in Poland is the SRT-3 device method of the Roads and Bridges Research Institute (IBDiM) that takes measurement with the use of a trailer with a locked wheel [7]. The regulation does not define a specific test method, requiring only a proven correlation with the friction coefficient of the tyre with no threads (blank) of the size 5.60S × 13 at a full skid. To determine the mean profile depth (MPD), a laser profilograph is used according to PN-EN ISO 13473-5:2010E or volumetric methods (e.g. a calibrated sand) according to PN-EN 13036-1:2010 (commonly used in Poland at acceptance of pavements). Works related to applying the photogrammetric method to determine the performance characteristics of the selected road pavements were carried out [8].

The research methods used for measuring road noise can be divided into two groups: remote methods, e.g. a statistical pass-by (SPB) (ISO 11819-1), which consists of measuring the noise level at a distance (from the side of the road according to the specific standard guidelines), and the near-field method, e.g. the close proximity trailer (CPX) (ISO 11819-2) that measures the level of noise generated at the contact of the tyre with the pavement surface inside an acoustically insulated measurement trailer. The diagnostic testing of the pavements and the measurements of the performance features were the basis for a number of national and international projects. The changes in the pavement characteristics (including an open structure) during their use were presented, among others, in the paper [9], and their impact on road safety and an effective monitoring at the system level is the subject of the work [10]. The main differences between the types of pavements as well as their characteristics were included in the publication [11], described in detail: in terms of the road noise in [5] and in terms of the friction coefficient in [1] and [12]. The methodology of an image analysis is described in [13].

2. CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy badawczej przedstawionej w artykule było ustalenie, czy możliwe jest określenie właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni, jej „hałaśliwości” oraz głębokości tekstury na bazie analizy graficznej pola kontaktu opony z nawierzchnią. Na podstawie przeprowadzonych studiów literaturowych i analiz zaproponowano nową metodę określania głębokości tekstury oraz współczynnika tarcia i hałasu powstającego na styku opony z nawierzchnią, bazując na analizie obrazu pola kontaktu opony z nawierzchnią. Zaproponowaną metodę zweryfikowano wstępnie na ośmiu sekcjach badawczych poprzez sprawdzenie korelacji z badaniami standardowymi współczynnika tarcia urządzeniem SRT-3, głębokości profilu makrotekstury MPD profilografem laserowym oraz hałasu drogowego metodą CPX.

3. OPIS METODY

Zaproponowana w pracy metoda badawcza polega na pobraniu i analizie obrazu pola kontaktu opony z nawierzchnią poprzez przetoczenie opony przez kliszę umieszczoną bezpośrednio na nawierzchni i na analizie graficznej. Koło pomiarowe może być jednym z kół pojazdu, kołem przyczepki lub innego przyrządu przygotowanego do tego celu, np. wózka. Uzyskane obrazy poddaje się obróbce graficznej tak, by możliwe było wyodrębnienie poszczególnych obszarów kontaktu ziaren kruszywa. Tak wygenerowany obraz binarny może podlegać wielu działaniom analitycznym: zliczaniu punktów styku, pomiarowi całkowitego pola kontaktu, pomiarowi pola powierzchni poszczególnych miejsc styku, odległości pomiędzy miejscami styku itd., na podstawie których wyznaczane są parametry opisujące pole kontaktu opony z nawierzchnią.

W trakcie badań pole kontaktu opony z nawierzchnią rejestrowano za pomocą klisz, czyli połączonych z czarną kalką maszynową kartek białego papieru formatu A4. Zeskanowane odwzorowanie powierzchni styku przenoszono do pamięci komputera (Rys. 1a). Uzyskany obraz podlegał przycięciu na szerokość opony i 80% długości pola kontaktu opony z nawierzchnią (Rys. 1c). Miało to na celu odrzucenie niezaczernionego obszaru kartki oraz stref przejściowych – początku i końca śladu bieżnika. Przycięty obraz poddawano standardowej, wstępnej obróbce, podobnie do tej stosowanej w innych pracach [14, 15] z zakresu analizy obrazu nawierzchni i mieszanek mineralno-asfaltowych w celu uzyskania znormalizowanych obrazów o zbliżonym natężeniu. Następnie wykonano binaryzację (Rys. 1d-e).

2. OBJECTIVES AND SCOPE

The aim of the research presented in the article was to establish whether it is possible to determine the anti-skid properties of the pavement, its “noise” and the texture depth on the basis of a graphic analysis of a tyre/pavement contact point. On the basis of literature studies and preliminary analyses, a new method was suggested to determine the texture depth as well as the friction and noise coefficient generated at the tyre/pavement contact point, on the basis of its image analysis. Based on field measurements performed on the eight test sections, the effectiveness of the proposed method was verified by examining the correlation with the standard testing of the friction coefficient by the SRT-3 device, of the depth profile of the macrotexture MPD with the laser profilograph and road noise by the CPX method.

3. METHOD DESCRIPTION

The research method proposed in the paper consists in collecting and analysing using image analysis the tyre/pavement contact point by rolling the tyre on the plate, placed directly on the pavement to make a print image. The measuring wheel can be one of the vehicle wheels, a wheel of a trailer or another device prepared for that purpose, for example, a truck. The obtained images are subjected to graphic processing so as to be able to isolate specific areas of contact points of the aggregate. The binary image, generated this way, can be analysed by various analytical methods, including calculating contact points, measuring the total contact point area, measuring the area of particular contact points, the distance between the contact points, etc., on the basis of which the parameters describing the contact point of the tyre with the pavement are determined.

During the research, the tyre/pavement contact point was registered with the use of plates, i.e. A4 size white paper sheets connected by a carbon paper. The scanned images of the contact points were saved in a computer memory (Fig. 1a). The resulting image was subject to being cropped to the width of a tyre and 80% of the length of the contact point of a tyre with the pavement (Fig. 1c). The aim of this was to reject the unmarked area of a sheet of paper and the transition zones – the beginning and end of the tread print. The cropped image was subjected to a standard pre-treatment, similar to that used in other studies [14, 15] in the field of image analysis of a pavement and asphalt mixtures to obtain standardized images of similar

Dysponując obrazem binarnym możliwe było przeprowadzenie na nim działań umożliwiających wyodrębnienie poszczególnych cząstek obrazu, czyli miejsc kontaktu nawierzchni z oponą – szczytów ziaren (Rys. 1f). Na podstawie tak przygotowanego obrazu binarnego program komputerowy dokonywał analizy obrazu polegającej na wydzieleniu cząstek oraz podawał ich charakterystykę – określenie położenia i geometrii (Rys. 2).

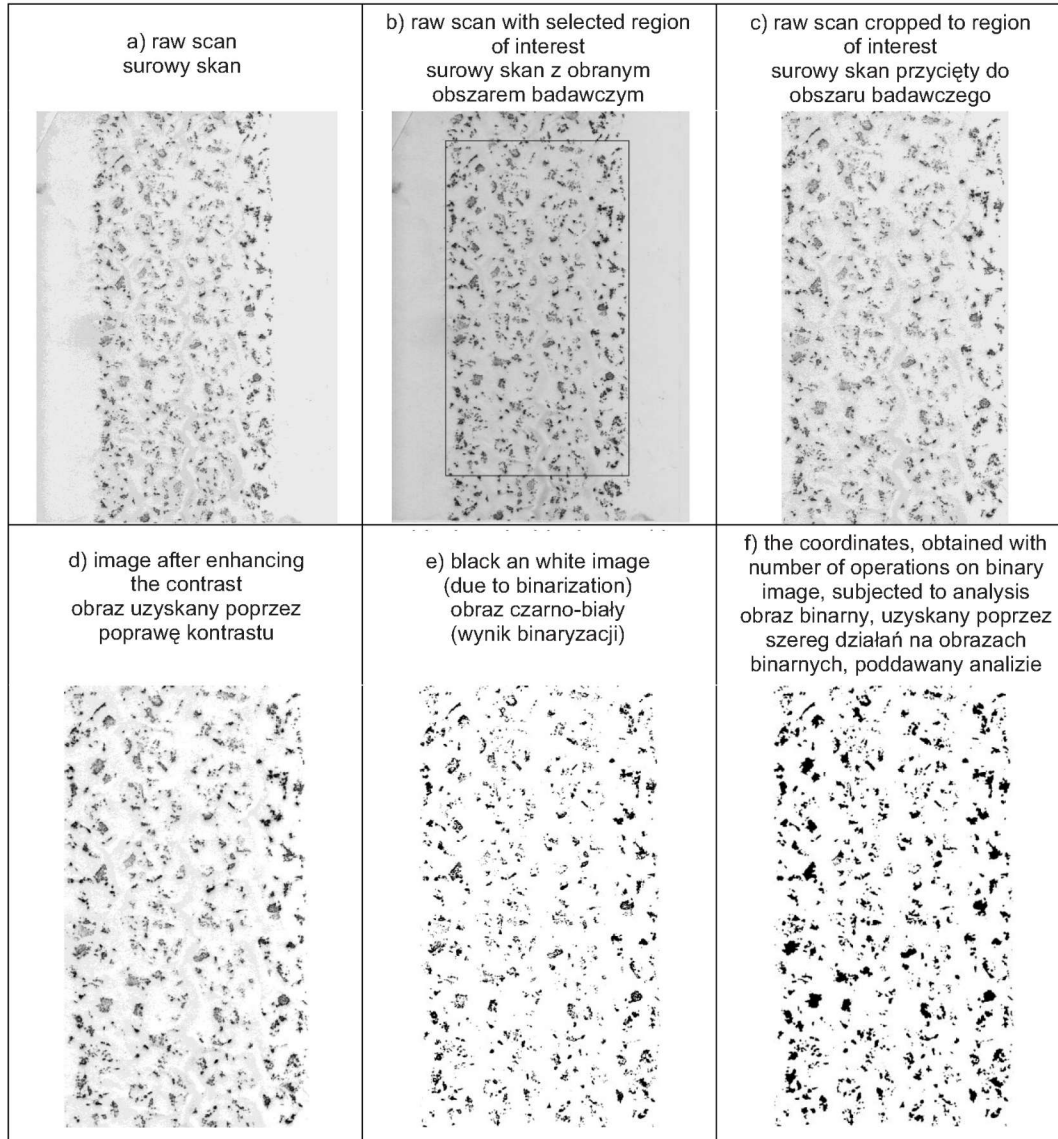


Fig. 1. Stages of image preparation for computer analysis
Rys. 1. Etapy przygotowania obrazu do analizy komputerowej

intensity. Then the binarization was performed (Fig. 1d-e). With a binary image it was possible to carry out activities that enabled individual particles of an image to be distinguished, i.e. contact points of the tyre and the pavement – grain peaks (Fig. 1f). On the basis of such prepared binary image, a computer program performed the image analysis consisting in separating the particles and gave their measurements – the coordinates and geometry (Fig. 2).

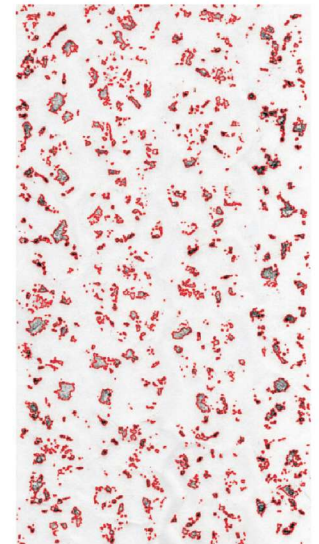


Fig. 2. Presentation of the analyzed particles (boundaries of particle shown in red) plotted on a sample print
Rys. 2. Wizualizacja wyodrębnionych cząstek (granice ziaren w postaci czerwonych obwódek) naniesiona na przykładowy odcisk

Do obróbki każdego ze skanów przyjęto jednakową procedurę, opracowaną metodą iteracji, aż do uzyskania porównywalnego odwzorowania. W trakcie realizacji pracy wybrano trzy parametry umożliwiające ocenę współczynnika tarcia, głębokości tekstury oraz „hałaśliwości”:

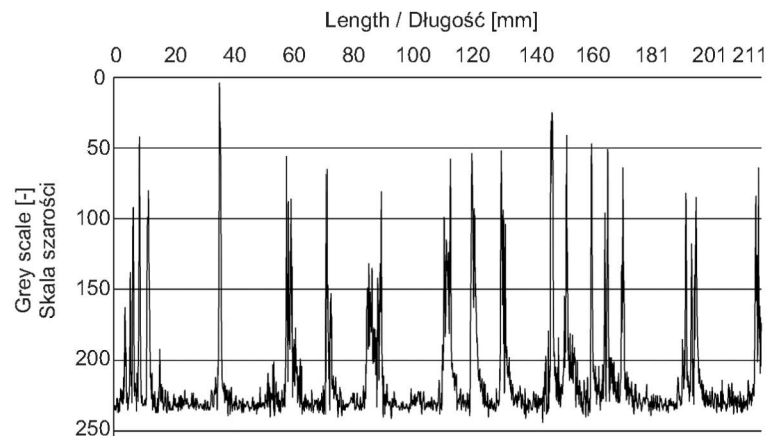
- gęstość punktów styku GP [$1/\text{cm}^2$], określająca liczbę miejsc styku nawierzchni z oponą (szczytów ziaren) na centymetr kwadratowy pola kontaktu opony z nawierzchnią;
- najbliższy sąsiad NS [mm]. Jest to uśredniona odległość do najbliższej sąsiedniej cząstki, wyznaczana dla każdej wyodrębnionej cząstki obrazu. Odległość mierzona jest pomiędzy środkami ciężkości wyodrębnionych cząstek;
- profil skali szarości PS [-], który w odróżnieniu od dwóch poprzednich nie jest wyznaczany na podstawie analizy obrazu binarnego, lecz w oparciu o analizę obrazu szarego (Rys. 1d). Podczas wyznaczania tego parametru wykorzystuje się założenie, że im intensywniejsze jest oddziaływanie opona/nawierzchnia, tym większe będzie zaczernienie obrazu w miejscu styku. Jednocześnie im silniejsze jest to oddziaływanie, tym bliżej opony znajduje się odciskane ziarno. Przykładowy profil skali szarości wykreślony wzdłuż pola kontaktu opony z nawierzchnią (odcisku) pokazuje Rys. 3. Wartość parametru PS oblicza się według wzoru (1). Parametr PS ma tę własność, że pokazuje jak bardzo od linii prostej odbiega wykreślony profil skali szarości. W przypadku linii prostej przybiera wartość $PS = 0$.

$$PS = \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_{i+1} - X_i}{D} \right) - \left(\frac{X_i - X_{i-1}}{D} \right), \quad (1)$$

gdzie:

- X_i – skala szarości i -tego piksela,
- D – odległość pomiędzy pikselami.

Do analiz przyjęto $D = 1$ ze względu na jednakową skalę każdego z odcisków.



For the processing of each scan the same procedure was applied, developed by the iteration method, until a comparable mapping was reached. During the research, three parameters were selected to assess the friction coefficient, texture depth and “noise”:

- the density of the contact points GP [$1/\text{cm}^2$] that specifies the number of the contact points between the pavement and the tyre (grain peaks) per square centimetre of the contact point of the tyre and the pavement;
- the nearest neighbour NN [mm]. It is an averaged distance to the nearest neighbouring particle, determined for each of the separate particle of an image. The distance is measured between the centres of gravity of the separated image particles;
- the grey scale profile of PS [-], which, unlike the previous two parameters, is not determined on the basis of the binary image analysis, but on a grey image analysis (Fig. 1d). When determining this parameter, the assumption is applied that the more intense the impact of the tyre/pavement is, the greater the density of the image at the contact point would be. At the same time, the stronger this impact is, the closer the grain to the tyre is. An example of the grey scale profile determined along the contact point of the tyre with the pavement (print) is shown in Fig. 3. The PS parameter value is calculated according to equation (1). The PS parameter has the property that shows how much the determined grey scale profile deviates from a straight line. In the case of a straight line, it has the property that shows how $PS = 0$.

where:

- X_i – grey scale of the i^{th} pixel,
- D – the distance between pixels

For the analysis, $D = 1$ was adopted, due to the same scale of each print.

Fig. 3. Sample grey scale profile of OGFC11 print
Rys. 3. Przykładowy profil skali szarości pola kontaktu opony z nawierzchnią OGFC11

4. BADANIA TERENOWE

Metodę zweryfikowano wstępnie wykonując pomiary pola kontaktu opony z nawierzchnią oraz CPX, SRT-3 i MPD nawierzchni na odcinku doświadczalnym w Bolimowie. Odcinek ten związany jest z realizacją projektu „Innowacyjna technologia nawierzchni drogowych o obniżonej emisji hałasu” CiDRO przez konsorcjum Politechniki Warszawskiej, IBDiM oraz Mostostalu Warszawa S.A., współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) [16]. Odcinek zlokalizowany jest w ciągu południowej jezdni serwisowej odcinka autostrady A2, przebiegającej w pobliżu miejscowości Bolimów pod Warszawą. W jego skład wchodzi osiem sekcji nawierzchni (Rys. 4), z czego dwie są nawierzchniami referencyjnymi (mieszanki mineralno-asfaltowe typu AC11S, SMA11), a sześć prototypowymi. Cztery z nich to nawierzchnie charakteryzujące się strukturą otwartą asfaltu porowatego (PA8 i PA11) oraz *open graded friction course* (OGFC8, OGFC11), a pozostałe dwie to tzw. ciche mieszanki mastyksowo-grysowe SMA 5 i SMA 8.



Fig. 4. Diagram of test site experimental sections [16]

Rys. 4. Schemat podziału odcinka doświadczalnego na sekcje badawcze [16]

W trakcie badań pobrano odciski trzech opon (Rys. 5): dwóch opon stosowanych standardowo w metodzie badania hałasu drogowego CPX oraz jednej zamontowanej w samochodzie osobowym:

- opona A: AVON Supervan AV4 195 R14C 8PR 106/104N, symulująca zachowanie opon przeznaczonych do użytku w pojazdach ciężarowych, zamontowana na przyczepce CPX,
- opona B: UNIROYAL Tigerpaw P225/60R16 97S, przeznaczona do użytku w pojazdach osobowych, zamontowana na przyczepce CPX,
- opona C: CONTINENTAL Premium Contact 2 205/65 R15 94H o głębokości bieżnika 6,5 mm, zamontowana na przednim lewym kole samochodu osobowego Volvo 760.

4. FIELD STUDIES

The method was primarily verified by performing measurements of the tyre/pavement contact point as well as CPX, SRT-3 and MPD of the pavement at the experimental section in Bolimów. This section is related to the project “The innovative technology of road pavements with reduced noise emission” CiDRO by a consortium of the Warsaw University of Technology, IBDiM and Mostostal Warszawa S.A., co-financed by the National Center for Research and Development (NCBR). [16]. The section is located in the southern part of the service road to the A2 motorway, running in the proximity of the town of Bolimów near Warsaw. It consists of eight sections of the pavement (Fig. 4), of which two are the reference pavements (asphalt mixtures AC11S and SMA11 type), and six of them are prototypes. Four of them are the pavements that are characterized by an open structure of the porous asphalt (PA8 and PA11) and open graded friction course (OGFC8, OGFC11), the other two are the so-called quiet stone mastic (matrix) asphalt of SMA 5 and SMA 8.

In the study, three tyre prints were collected (Fig. 5): the prints of two tyres normally used in the test method of the road noise CPX and one mounted in a passenger car:

- tyre A: AVON Supervan AV4 195 R14C 8PR 106/104N, simulating the behaviour of tyres intended for use in trucks, mounted on the CPX trailer,
- tyre B: UNIROYAL Tigerpaw P225/60R16 97S, designed for use in passenger vehicles, mounted on the CPX trailer,
- tyre C: CONTINENTAL Premium Contact 2 205/65 R15 94H with a tread depth of 6.5 mm, mounted on the front left wheel of a Volvo 760 passenger car.



Fig. 5. Treads of printed tyres, from left: tyre A and tyre B [17], tyre C
Rys. 5. Bieżniki odciskanych opon, od lewej: opona A i opona B [17], opona C

5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

5.1. UWAGI OGÓLNE

Wykonano łącznie 56 odcisków – na każdej nawierzchni po trzy odciski opony A oraz po dwa odciski opon B i C. Parametry (gęstość punktów styku *GP* i najbliższy sąsiad *NN*) wyznaczono dla każdego z odcisków. Ze względu na budowę bieżnika umożliwiającą poprowadzenie ciągłej linii, nieprzerwanej przez poprzeczne rowki bieżnika, profil skali szarości *PS* wyznaczono jedynie dla odcisków opony C. Ze względu na ograniczenia objętościowe artykułu nie przedstawiono analizy odchyżeń statystycznych pomiędzy uzyskanymi pomiarami dla tych samych sekcji, stwierdzono jednak na podstawie badań z zastosowaniem opony A, że dwa odciski są wystarczające do wykonania pomiarów.

5.2. ZASTOSOWANIE METODY ANALIZY OBRAZU DO CHARAKTERYSTYKI NAWIERZCHNI

Otrzymane wartości parametrów dla ośmiu rodzajów nawierzchni przedstawiają Rys. 6-8 oraz Tabl. 1. Stwierdzić można, że w przypadku gęstości punktów styku *GP* (Rys. 6) wpływ rodzaju odciskanej opony jest niewielki. Najbardziej zbliżone są do siebie wartości opisujące odciski ogumienia normowego, stosowanego w metodzie CPX pomiaru hałasu, wypełnionego gazem o jednakowym ciśnieniu oraz obciążane w identyczny sposób, lecz o różnej budowie bieżnika. Sugeruje to, że zachowując stałe warunki testu porównywać można ze sobą wyniki otrzymywane przy użyciu różnych opon. Jednocześnie rezultaty analizy pola kontaktu opony z nawierzchnią nienormowej i inaczej obciążanej opony C utrzymują się na poziomie około 85% wartości dla opon A i B bez względu na rodzaj nawierzchni. Ponadto

5. TEST RESULTS ANALYSIS

5.1. GENERAL REMARKS

A total number of 56 prints were made, on every pavement three tyre A prints and two prints of tyres B and C each. The parameters of the density of the *GP* contact points and the nearest neighbour *NN* were determined for each print. Due to the construction of the tread enabling routing of a solid line, continuing through the transverse grooves of the tread, the *PS* grey scale profile was determined only for the prints of the tyre C. Due to volume limitations of the article, no analysis of statistical deviations between the measurements obtained for the same section was conducted, but on the basis of the above mentioned studies, using the A tyre, it has been stated that two prints are sufficient to perform the measurements.

5.2. APPLICATION OF THE IMAGE ANALYSIS METHOD FOR THE PAVEMENT CHARACTERISTICS

The resulting parameters for the eight types of pavements are presented in Fig. 6-8 and in Table 1. It can be concluded that in the case of the *GP* contact points' density (Fig. 6) the impact of the type of the tyre, which is being printed, is insignificant. Most similar are the values describing the prints of standard tyres, which are used in the CPX method of noise measurement, with the same inflation and loaded in the same way, but with a different structure of the tread. This suggests that maintaining constant test conditions enable the results obtained using different tyres to be compared with each other. At the same time the results of the analysis of the contact point of a tire with the non-standard surface and a tyre C that is loaded in a different way remain at a level of about 85% of the

zaobserwować można wyraźną tendencję spadku wartości parametru GP wraz ze wzrostem maksymalnego wymiaru kruszywa mieszanki mineralno-asfaltowej: im grubsze kruszywo, tym mniejsza gęstość punktów styku. Wartości parametru najbliższy sąsiad NN (Rys. 7) także wykazują podobieństwo wyników pomiędzy trzema oponami. W tym przypadku występuje tendencja przeciwna do wcześniej opisanej, tj. wzrostu wartości parametru NN wraz ze wzrostem maksymalnego wymiaru kruszywa mieszanki mineralno-asfaltowej: im grubsze kruszywo, tym bardziej rozległe przestrzenie pomiędzy nimi.

tyres A and B, regardless of the type of the pavement. In addition, a clear trend can be observed in the decline of the value of the GP parameter with a simultaneous increase of the maximum size of aggregate in the asphalt mixture: the greater the aggregate, the lower the density of the contact points. The values of the nearest neighbour NN parameter (Fig. 7) also show a similarity of results between the three tyres. In this case, there is an opposite trend to that previously described, i.e. the increase in the value of the NN parameter with an increase in the maximum size of the asphalt mixture: the greater the aggregate, the more extensive the spaces between them.

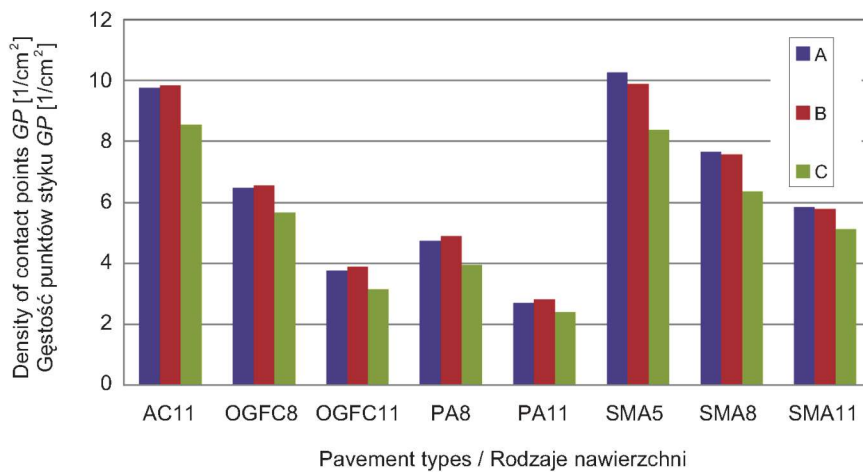


Fig. 6. Density of tyre/pavement contact points GP [1/cm²]
Rys. 6. Gęstość punktów styku opony z nawierzchnią GP [1/cm²]

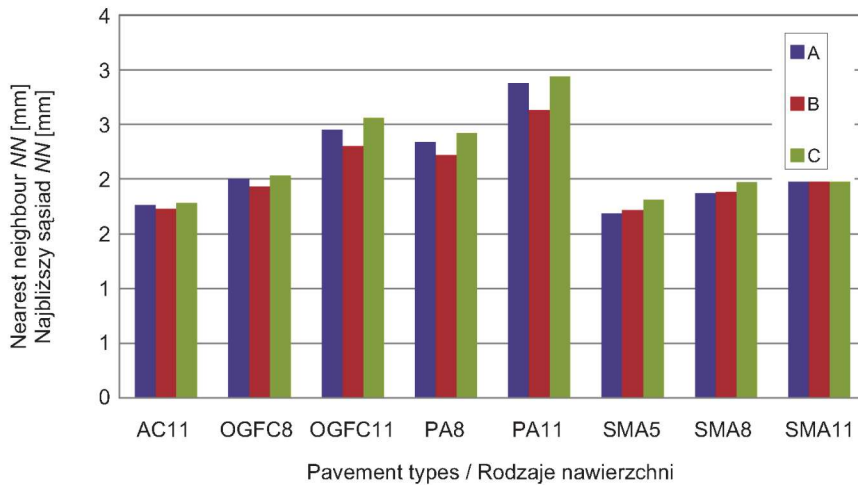


Fig. 7. Nearest neighbour NN [mm]
Rys. 7. Najbliższy sąsiad NN [mm]

Analiza Rys. 8 wykazuje brak związku pomiędzy uziarnieniem mieszanki mineralno-asfaltowej zastosowanej w nawierzchni a wartością parametru profilu skali szarości PS . Nawierzchnie o strukturze otwartej charakteryzują się wartościami PS na niskim poziomie, ponieważ przetaczająca się

The analysis of Fig. 8 shows no relationship between grains of the asphalt mixture used in the pavement and the value of the parameter of the PS grey scale profile. The pavements with an open structure are characterized by the PS values at a low level, because the tyre that rolls over

po nich opona utrzymuje kontakt na mniejszej powierzchni niż zachodzi to na nawierzchniach o strukturze zamkniętej (co potwierdzają wartości *GP*). Skutkuje to brakiem zacementowania oraz wygładzeniem linii profilu skali szarości.

them maintains the contact on a smaller surface than on pavements with a closed structure (as confirmed by the *GP* values). This results in a lack of density and line smoothing in a grey scale profile.

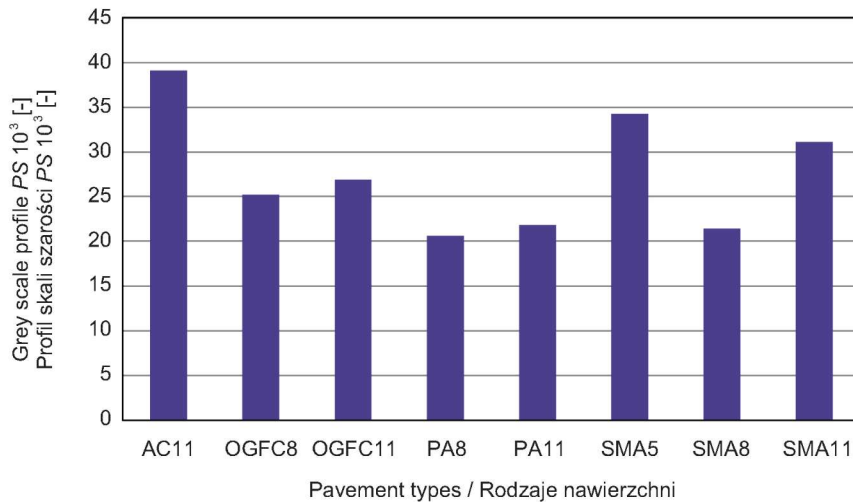


Fig. 8. Grey scale profile *PS* [-]
Rys. 8. Profil skali szarości *PS* [-]

Table 1. Results of tyre prints analysis

Tablica 1. Wyniki analizy pola kontaktu opony z nawierzchnią

Pavement type Rodzaj nawierzchni	Tyre / Opona A		Tyre / Opona B		Tyre / Opona C		Grey scale profile Profil skali szarości <i>PS</i> [-]
	Density of contact points Gęstość punktów styku <i>GP</i> [$1/\text{cm}^2$]	Nearest neighbour Najbliższy sąsiad <i>NN</i> [mm]	Density of contact points Gęstość punktów styku <i>GP</i> [$1/\text{cm}^2$]	Nearest neighbour Najbliższy sąsiad <i>NN</i> [mm]	Density of contact points Gęstość punktów styku <i>GP</i> [$1/\text{cm}^2$]	Nearest neighbour Najbliższy sąsiad <i>NN</i> [mm]	
AC11	9.75	1.76	9.83	1.73	8.55	1.78	39123
OGFC8	6.47	2.00	6.55	1.93	5.67	2.03	25193
OGFC11	3.77	2.45	3.90	2.30	3.14	2.56	26859
PA8	4.74	2.34	4.89	2.22	3.95	2.42	20616
PA11	2.70	2.88	2.82	2.63	2.40	2.94	21817
SMA5	10.26	1.69	9.88	1.72	8.38	1.81	34280
SMA8	7.67	1.87	7.58	1.88	6.36	1.97	21406
SMA11	5.85	2.00	5.79	1.98	5.12	2.06	31139

5.3. KORELACJA METOD POMIAROWYCH

W celu sprawdzenia możliwości zastosowania metody analizy obrazu do oceny właściwości nawierzchni przeprowadzono test korelacji. Skorelowano wyniki uzyskane metodą analizy obrazu z wynikami ustandaryzowanych metod badawczych właściwości powierzchniowych nawierzchni

5.3. CORRELATION OF THE MEASUREMENT METHODS

In order to verify the applicability of the method of image analysis to evaluate the pavement properties, the correlation test was performed. The results obtained by image analysis were correlated with the results of standardized test methods of the pavement properties performed on the

wykonanych na tych samych sekcjach nawierzchni. Wykonano testy korelacji z badaniami realizowanymi w projekcie CiDRO: profilograficzną metodą *mean profile depth* (MPD) oceny głębokości tekstury, metodą SRT-3 badania współczynnika tarcia oraz metodą badania hałasu drogowego CPX. Badanie MPD i SRT-3 wykonał Zakład Diagnostyki Nawierzchni Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, natomiast pomiar CPX przeprowadziła Politechnika Gdańska. Badania te wykonano w podobnym czasie do pobierania odcisków opon.

Do ustalenia korelacji pomiędzy metodami w przypadku współczynnika tarcia wybrano test korelacji z parametrem $E(\mu)$ (średni współczynnik tarcia z odcinków pomiarowych) ze względu na jego sens fizyczny. Wielkość μ_m , czyli miarodajny współczynnik tarcia, jest wielkością statystyczną będącą sumą wartości średniej $E(\mu)$ oraz odchylenia standardowego. Z powodu niewielkiej populacji prób obliczanie odchylenia standardowego dla metody analizy pola kontaktu opony z nawierzchnią jest nieuzasadnione. W przypadku hałasu drogowego wykorzystano poziomy hałas zmierzony przez mikrofony przyczepki CPX wyrażone w dB(A), a nie indeks CPXI, ponieważ jest on średnią ważoną wielu opon poddawanych testom. Dodatkowo przyporządkowano wyniki uzyskane na poszczególnych oponach odpowiadającym im odciskom.

Analizując uzyskane wyniki stwierdzono korelację o średnim współczynniku $R^2 = 0,91$ pomiędzy opisem odcisków za pomocą gęstości punktów styku *GP*, a szacowaną głębokością tekstury *ETD* zmierzoną metodą MPD (Rys. 9). Zaobserwowano także korelację o średnim współczynniku $R^2 = 0,96$ pomiędzy opisem odcisków za pomocą parametru najbliższy sąsiad *NN* a szacowaną głębokością tekstury *ETD* zmierzoną metodą MPD (Rys. 10). Uzyskano korelację o współczynniku $R^2 = 0,89$ pomiędzy opisem pola kontaktu opony z nawierzchnią, za pomocą profilu skali szarości *PS*, a średnim współczynnikiem tarcia $E(\mu)$ zmierzonym metodą SRT 3 przy prędkości 60 km/h (Rys. 11). W przypadku współczynnika tarcia występującego przy dwa razy mniejszej prędkości (30 km/h) otrzymano niższą korelację o współczynniku $R^2 = 0,78$ pomiędzy opisem pola kontaktu opony z nawierzchnią za pomocą profilu skali szarości *PS* a średnim współczynnikiem tarcia $E(\mu)$, zmierzonym metodą SRT-3 (Rys. 12). Sprawdzone korelację pomiędzy opisem odcisków za pomocą gęstości punktów styku *GP* a metodą CPX badania hałasu drogowego (Rys. 13). W tym przypadku zaobserwowano brak korelacji ($R^2 = 0,31$), niezależnie od prędkości pomiarowej.

same pavement sections. The correlation tests were performed with the research carried out in the CiDRO project: by the mean profile depth (MPD) method of texture depth assessment, using the SRT-3 friction coefficient test and by using a method of testing the road noise CPX. The MPD and SRT-3 tests were performed by the Department of Diagnostic of Pavement of the Research Institute of Roads and Bridges, whereas the CPX measurement was carried out by Gdańsk University of Technology. These tests were performed in a similar time as taking of the tyre prints.

To determine the correlation between the methods in the case of the friction coefficient, the correlation test with the $E(\mu)$ parameter was chosen (mean friction coefficient of the measuring sections) due to its physical meaning. The μ_m value, which is a reliable friction coefficient, constitutes a statistical value which is the sum of the mean $E(\mu)$ and a standard deviation. Because of the small population number, calculating the standard deviation of the method of the analysis of a contact point with the pavement is not proper. In the case of road noise the noise levels measured by the microphones of the trailer CPX expressed in dB(A) were used and not CPXI index, because it is a weighted average of the number of tyres being tested. In addition, the obtained results were assigned to each tyre corresponding to its print.

Analysing the results, there has been found an average correlation coefficient $R^2 = 0.91$ between the description of prints by the density of contact points *GP* and *ETD* respectable texture depth as measured by MPD (Fig. 9). An average coefficient of correlation $R^2 = 0.96$ was also observed between the description of prints using nearest neighbour parameter *NN* and the estimated *ETD* texture depth as measured by *MPD* (Fig. 10). Correlation coefficient $R^2 = 0.89$ was obtained between the description surface of the tyre contact with the road pavement, using the grey scale profile of the *PS*, and the average friction coefficient $E(\mu)$ as determined by the SRT-3 at a speed of 60 km/h (Fig. 11). In case of the friction coefficient at two times lower speed (30 km/h) there was a lower correlation coefficient $R^2 = 0.78$ between a description of area of the tyre/pavement contact using the profile grey scale *PS* and the average friction coefficient $E(\mu)$, as measured by the SRT-3 (Fig. 12). The correlation between the description of prints by the density of *GP* contact points and road noise test CPX (Fig. 13) was verified. In this case, no correlation was observed ($R^2 = 0.31$), regardless of the measurement speed.

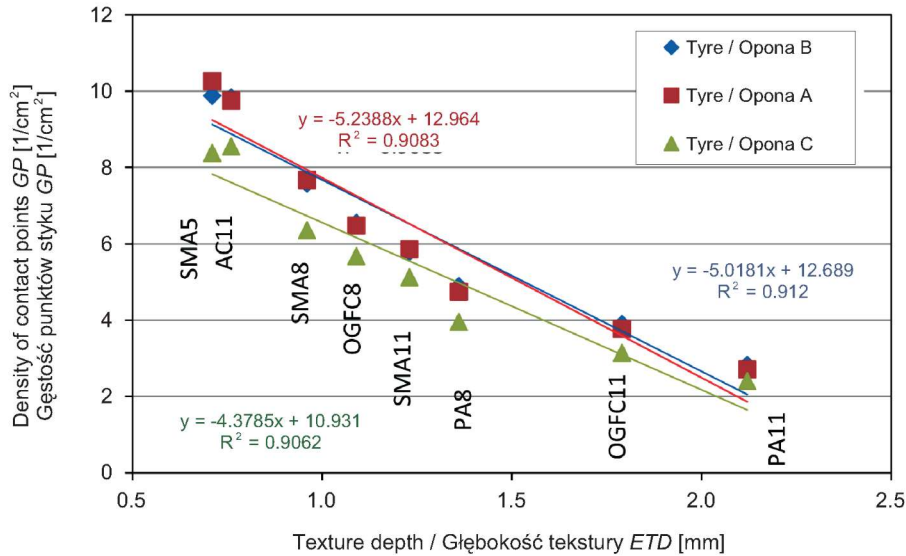


Fig. 9. Density of contact points GP versus estimated texture depth ETD
Rys. 9. Zależność pomiędzy gęstością punktów styku GP a szacowaną głębokością tekstury ETD

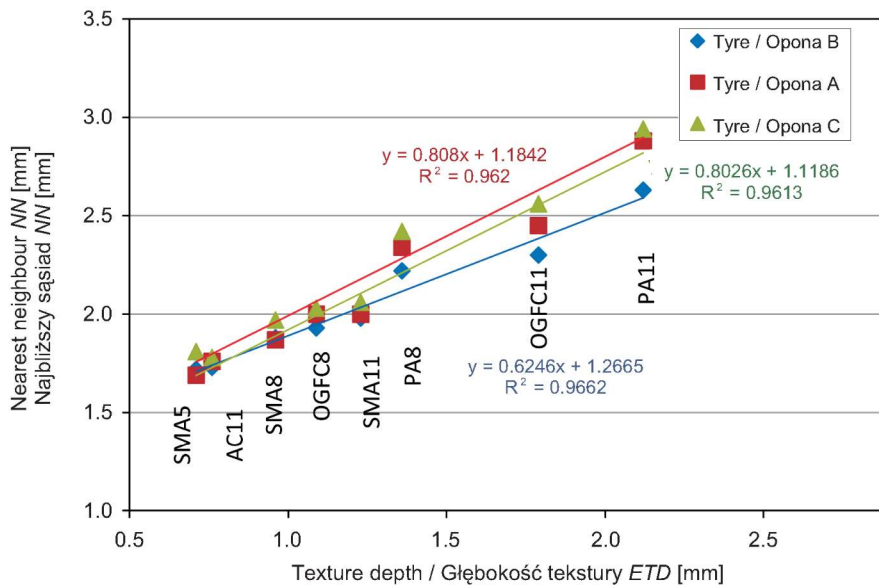


Fig. 10. Nearest neighbour NN versus estimated texture depth ETD
Rys. 10. Zależność pomiędzy najbliższym sąsiadem NN a szacowaną głębokością tekstury ETD

Brak zależności spowodowany może być nieczułością zaproponowanej metody na budowę wewnętrzną nawierzchni. Powszechnie wiadomo, że nawierzchnie o strukturze otwartej, m.in. PA i OGFC, charakteryzują się zdolnością do absorpcji fal dźwiękowych, a tym samym wygłuszenia hałasu drogowego. Dodatkowo obecność pustych, połączonych ze sobą przestrzeni redukuje udział mechanizmów związanych ze sprężaniem i rozprężaniem powietrza pod ogumieniem pojazdów w generowaniu hałasu na styku

The lack of correlation may be caused by the insensitivity of the proposed method for the construction of internal roads. It is well known that the surfaces of the open structure, such as PA or OGFC, are characterized by the ability to absorb sound waves, thereby insulating against road noise. Additionally, the presence of spaces which are both empty and connected to each other reduces the share of mechanisms associated with the compression and expansion of air under the tyres of vehicles in generating noise

opony z nawierzchnią. Potwierdzenie takiej tezy może stanowić wykres przedstawiony na Rys.14, na którym do analizy korelacji odrzucono nawierzchnie o strukturze otwartej i pozostawiono nawierzchnie o strukturze zamkniętej. W tym przypadku można zaobserwować znacznie wyższą korelację o współczynniku $R^2 = 0,88$. Podobne zależności możliwe są do zaobserwowania dla drugiej prędkości badania (50 km/h) oraz pozostałych opon.

print. A confirmation of this hypothesis is shown on a graph in Fig. 14, in which the correlation analysis was discarded in case of open structure surfaces and left in surfaces of the closed structure. In this case, it can be observed a significantly higher correlation coefficient $R^2 = 0.88$. Similar results can be seen for the second test speed (50 km/h) and the remaining tyres.

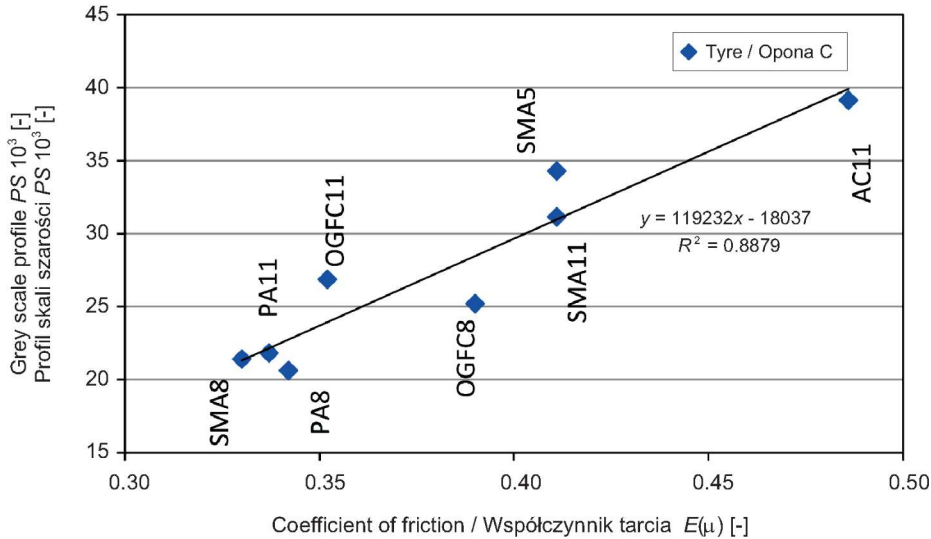


Fig. 11. Grey scale profile PS versus coefficient of friction measured with SRT-3 trailer at 60 km/h

Rys. 11. Zależność pomiędzy profilem skali szarości PS a współczynnikiem tarcia wyznaczonym metodą SRT-3 przy 60 km/h

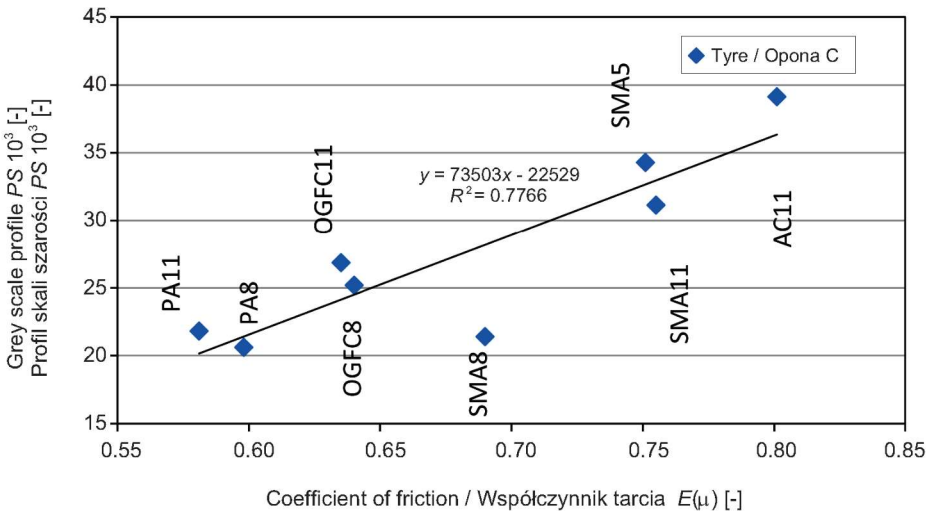


Fig. 12. Grey scale profile PS versus coefficient of friction measured with SRT-3 trailer at 30 km/h

Rys. 12. Zależność pomiędzy profilem skali szarości PS a współczynnikiem tarcia wyznaczonym metodą SRT-3 przy 30 km/h

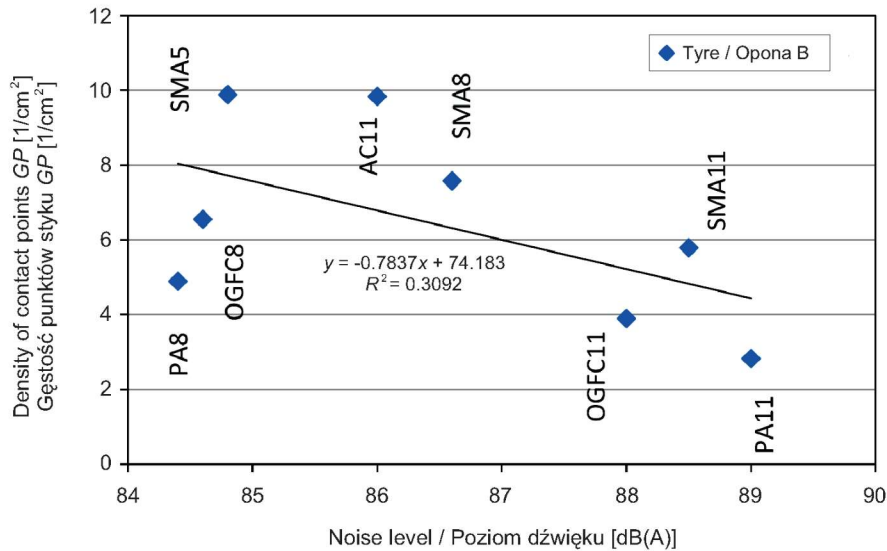


Fig. 13. Density of contact points GP versus tyre/road noise level measured with CPX trailer at 40 km/h for tyre B on every subsection

Rys. 13. Zależność pomiędzy gęstością punktów styku GP a poziomem dźwięku według metody CPX przy prędkości 40 km/h dla opony B na wszystkich nawierzchniach

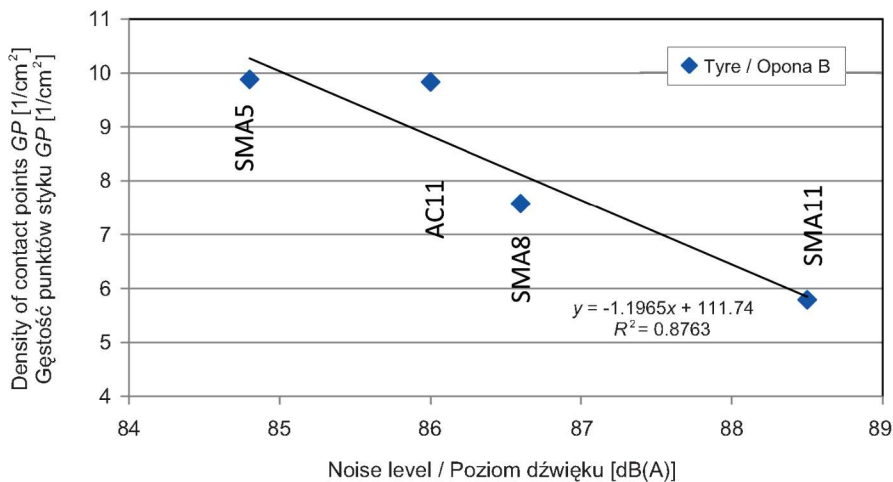


Fig. 14. Density of contact points GP versus tyre/road noise level measured with CPX trailer at 40 km/h for tyre B: subsections with closed structure

Rys. 14. Zależność pomiędzy gęstością punktów styku GP a poziomem dźwięku według metody CPX przy prędkości 40 km/h dla opony B: nawierzchnie o strukturze zamkniętej

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W trakcie badań i analiz stwierdzono, że istnieje korelacja pomiędzy oceną współczynnika tarcia i głębokości tekstury za pomocą analizy obrazu odcisków opon na nawierzchni a stosowanymi metodami badań tych właściwości – SRT-3 i MPD (profilografem laserowym). Wykazano także korelację prezentowanej metody z metodą pomiaru poziomu dźwięku w tzw. polu bliskim CPX na nawierzchniach o strukturze zamkniętej. Scharakteryzowana w artykule metoda określania współczynnika tarcia, głębokości makrotekstury i hałasu drogowego za pomocą analizy obrazu pola kontaktu opony z nawierzchnią jest nieskomplikowana oraz nie wymaga wysokiego wykwalifikowania operatora, ponieważ najważniejszą część analizy wykonuje program komputerowy. Procedura nie jest czasochłonna i kłopotliwa,

6. SUMMARY AND CONCLUSIONS

In the course of research and analysis, it was found that there is a correlation between the assessment of the friction coefficient and texture depth using image analysis of tyre prints on the surface and the commonly used test methods of testing those properties – SRT-3 and MPD. It was also demonstrated that there is a correlation of the presented method with the measurement method of sound level in the so-called CPX near field on surfaces with a closed structure. The method of determining the friction coefficient, macrotexture depth and road noise by image analysis of the contact point of a tyre with the pavement presented in the article is simple and does not require a high qualification of an operator, because the most important part of the analysis is performed by a computer

w odróżnieniu od pomiaru głębokości tekstury metodą piasku kalibrowanego. Materiały zastosowane do badania (kliša) są tanie i ogólnodostępne, metoda nie wymaga zastosowania specjalistycznych urządzeń oraz materiałów.

Należy jednocześnie pamiętać o ograniczeniach i problemach wymagających dalszych badań. W ogólnych pomiarach stanu nawierzchni (np. Pavement Management System PMS) metoda ta nie jest w stanie konkurować z metodą profilograficzną lub przyczepką SRT-3 ze względu na konieczność wstrzymania ruchu oraz znacznie mniejszą wydajność pomiaru. Dotychczasowe badania przeprowadzone zostały na odcinku doświadczalnym, którego nawierzchnie zbudowano z mieszanek mineralno-asfaltowych o tym samym kruszywie i lepiszczu oraz wykonano przez ten sam zespół pracowników i urządzeń. W celu stwierdzenia uniwersalności proponowanej metody należy przeprowadzić dodatkowe badania na innych odcinkach, w tym przede wszystkim w miejscach, gdzie dopuszczony jest publiczny ruch pojazdów, by stwierdzić wpływ polerowania kruszyw na możliwość zastosowania metody.

Uzyskane do tej pory wyniki zachęcają do dalszych badań w celu weryfikacji metody pomiarowej na większej próbie. W pewnych okolicznościach proponowana metoda mogłaby zastąpić metody objętościowe oceny głębokości tekstury oraz laboratoryjne metody badania współczynnika tarcia. Po odpowiednim dopracowaniu metoda mogłaby także służyć do oceny właściwości eksploatacyjnych nawierzchni w newralgicznych miejscach, takich jak: skrzyżowania, strome podjazdy, łuki o małych promieniach, przeprawy mostowe i tunele, na których utrzymanie wysokich właściwości przeciwpoślizgowych ma duże znaczenie dla zachowania bezpieczeństwa ruchu drogowego, a standardowe metody pomiarowe (np. SRT-3) są trudne lub niemożliwe do przeprowadzenia.

INFORMACJE DODATKOWE

Część badań wykorzystanych w niniejszej pracy powstała przy wsparciu finansowym Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz firmy Mostostal Warszawa S.A. w ramach realizacji projektu pt. „Innowacyjna technologia nawierzchni drogowych o obniżonej emisji hałasu” CiDRO w ramach przedsięwzięcia IniTech. Projekt realizowany jest w latach 2010-2015 przez konsorcjum w składzie: Politechnika Warszawska, Mostostal Warszawa S.A. oraz Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Autorzy składają podziękowania Kolegom z Politechniki Warszawskiej oraz Instytutu Badawczego Dróg i Mostów za dyskusję oraz pomoc w przygotowaniu niniejszego artykułu.

software. The procedure is neither time consuming nor troublesome, in contrast to measuring the texture depth using the method of calibrated sand. The materials used for testing (plate) are cheap and easily available, the method does not require the use of specialized equipment nor materials.

It should also be acknowledged that there are some limitations and problems that require further research. In general, in measurements of pavement conditions (e.g. Pavement Management System PMS) the method cannot compete with the profilographic method nor with a SRT-3 trailer due to the necessity of traffic control and significantly lower level of performance measurements. Previous studies were conducted on the experimental section, where the surfaces are constructed of asphalt mixtures of the same aggregate source and binder, and made by the same team and device. In order to establish the universality of the proposed method, additional studies should be carried out on other sections, including mainly places where the public traffic is permitted in order to determine the impact of aggregate polishing on the applicability of the method.

The results obtained so far encourage further studies to verify the measurement method on a larger sample. In certain circumstances, the proposed method could replace the volumetric methods of texture depth evaluation and laboratory methods of testing a friction coefficient. After proper refining, this method could also be used to assess the operating conditions in sensitive places such as: crossroads, steep climbs, curves with small radii, crossing bridges and tunnels, where maintaining high anti-slip properties is of great importance for the preservation of road safety, and where standard measurement methods (e.g. SRT-3) are difficult or impossible to carry out.

ACKNOWLEDGEMENT

Some studies used in this research were established with the support from the National Center for Research and Development as well as Mostostal Warszawa S.A. within the project entitled “The innovative technology of road pavements with reduced noise emission” within the framework of the project by CiDRO IniTech. The project has been conducted in 2010-2015 by a consortium composed of: Warsaw University of Technology, Mostostal Warszawa and the Research Institute of Roads and Bridges. The authors wish to thank the colleagues from the Warsaw University of Technology and the Research Institute of Roads and Bridges for the discussion and help in preparing this article.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Kummer H.W.*: Unified Theory of Rubber and Tire Friction. Pennsylvania State University, College of Engineering, University Park, Pennsylvania, 1966
- [2] *Mechowski T.*: Analiza i weryfikacja wymagań i procedur pomiarowych oceny właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni dróg publicznych i autostrad płatnych. Sprawozdanie TD71. IBDiM, Warszawa, 2005
- [3] *Hall J.W., Smith K.L., Titus-Glover L.C., Wambold J., Yager T.J., Rado Z.*: NCHRP Web-Only Document 108: Guide for Pavement Friction. National Cooperative Research Program, Transportation Research Board, Washington, 2009
- [4] *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
- [5] *Sandberg U., Ejsmont J.*: Tyre/Road Noise Reference Book. Informex, Kisa, Sweden, 2002
- [6] *Kucharski R.J.*: Hałas drogowy. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1979
- [7] *Szwabik B., Mechowski T.*: Zasady pomiaru i oceny właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni bitumicznych w Systemie Oceny Stanu Nawierzchni SOSN, Załącznik C. Biuro Studiów Sieci Drogowej Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych, Warszawa, 2002
- [8] *Krawczyk L.*: Ocena tekstury nawierzchni bitumicznych metodą fotogrametryczną. Drogownictwo, 4-5, 1985, 115-119
- [9] *Kowalski K.J., McDaniel R.S., Shah A., Olek J.*: Long Term Monitoring of the Noise and Frictional Properties of PFC, SMA and DGA Pavements. Transportation Research Record (TRR), Journal of the Transportation Research Board (TRB), **2127**, 2009, 12-19
- [10] *Heller S., Mechowski T., Harasim P.*: Application of diagnostics of pavement conditions for identification of dangerous places for road users. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **9**, 1, 2010, 57-76
- [11] *Piłat J., Radziszewski P.*: Nawierzchnie asfaltowe. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2010
- [12] *Arczyński S.*: Teoria ruchu samochodu. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1984
- [13] *Wojnar L., Kurzydłowski K.J., Szala J.*: Praktyka analizy obrazu. Polskie Towarzystwo Stereologiczne, Kraków, 2002
- [14] *Król J.*: Nowa metoda analizy mikrotekstury asfaltów modyfikowanych polimerami. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **7**, 4, 2008, 23-46
- [15] *Požarycki A., Rydzewski P.*: Cyfrowe przetwarzanie makroskopowych obrazów jezdni drogowych. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **11**, 3, 2012, 249-260
- [16] *Kowalski K., Radziszewski P., Bańkowski W., Otkalło K.*: Hałas toczenia na prototypowych odcinkach drogowych, w: Metody ochrony środowiska przed hałasem - teoria i praktyka. Ekkom, Zakopane, 2013, 145-158
- [17] *Morgan P., Sandberg U., van Blokand G., Schwanen W.*: The selection of new reference test tyres for use with the CPX method, to be specified in ISO/TS 11819-3. INTER-NOISE 2009, Curran Associates, Ottawa, Canada, 2009

STANDARDS / NORMY

1. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz. U. z dn. 14.05.1999 r.)
2. PN-EN ISO 13473-5:2010E Ocena tekstury nawierzchni przy pomocy techniki profilometrycznej - Część 5: Ocena megatekstury
3. PN-EN 13036-1:2010 Cechy powierzchniowe nawierzchni drogowych i lotniskowych - Metody badań - Część 1: Pomiar głębokości makrotekstury metodą objętościową
4. ISO 11819-1:1997 Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 1: Statistical Pass-By method
5. ISO 11819-2:2000 Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The Close-Proximity Method Draft Standard of working