

MARTA WASILEWSKA¹⁾
 WŁADYSŁAW GARDZIEJCZYK²⁾
 PAWEŁ GIERASIMIUK³⁾

EVALUATION OF SKID RESISTANCE OF EXPOSED AGGREGATE CONCRETE PAVEMENT IN THE INITIAL EXPLOITATION PERIOD

OCENA WŁAŚCIWOŚCI PRZECIWPÓŚLIZGOWYCH NAWIERZCHNI BETONOWYCH Z ODKRYTYM KRUSZYWEM W POCZĄTKOWYM OKRESIE ICH UŻYTKOWANIA

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono ocenę właściwości przeciwpślizgowych w początkowym okresie użytkowania na podstawie zmian makrotekstury i mikrotekstury, określonych za pomocą urządzeń CTM (ang. *Circular Texture Meter*) i DFT (ang. *Dynamic Friction Tester*) na dwóch odcinkach testowych na drodze ekspresowej S8 o nawierzchni betonowej z odkrytym kruszywem. Pomiary parametru MPD (ang. *Mean Profile Depth*) i współczynnika tarcia DFT20 wykonano po 2 i 6 tygodniach po wykonaniu nawierzchni oraz po 3 i 16 miesiącach od oddania do ruchu. W tym okresie nie zarejestrowano zmian w makroteksturze nawierzchni. Natomiast istotne zmiany zanotowano w mikroteksturze. Najniższe wartości DFT20, ustalone po 2 tygodniach, świadczą o zjawisku śliskości powykonawczej. Przyczyną takiego stanu mogą być pozostałości po środkach chemicznych stosowanych do pielęgnacji betonu. Na skutek działania czynników atmosferycznych i ruchu następuje usuwanie środka chemicznego z powierzchni i ustabilizowanie się współczynnika tarcia na pewnym poziomie. Pomiędzy 3 a 16 miesiącem użytkowania odnotowano około 20% spadek współczynnika tarcia. Uzyskane wyniki odniesiono do klasyfikacji opracowanej w Stanach Zjednoczonych na podstawie międzynarodowego wskaźnika tarcia IFI (ang. *International Friction Index*).

SŁOWA KLUCZOWE: makrotekstura, międzynarodowy wskaźnik tarcia, mikrotekstura, nawierzchnie betonowe z odkrytym kruszywem, właściwości przeciwpślizgowe, współczynnik tarcia.

ABSTRACT. The paper presents the evaluation of skid resistance of pavements in their early life on the basis of macrotexture and microtexture changes determined with the Circular Texture Meter (CTM) and the Dynamic Friction Tester (DFT). Tests were performed on two test pavement sections made from exposed aggregate concrete on S8 expressway located in Poland. The relevant parameters, namely the Mean Profile Depth MPD and the friction coefficient DFT20 were measured after two and six weeks from pavement construction and then after three and sixteen months of traffic loads. No changes to the macrotexture were observed in these periods. However, significant changes were observed in the microtexture. The lowest values of DFT20 were determined two weeks from paving, indicating the effect of increased slipperiness just after placement. This lower initial friction coefficient DFT20 can be attributed to the presence of curing agent residue. Such residues are gradually removed from the pavement surface by weathering and trafficking and then the value of DFT20 stabilizes and stays constant at a certain level. The coefficient of friction decreased by ca. 20% in the period between the third and the sixteenth month of trafficking. Finally, the results of evaluation were compared with the classification system developed in the U.S., based on the International Friction Index IFI.

KEYWORDS: exposed aggregate concrete, friction coefficient, International Friction Index, macrotexture, microtexture, pavement, skid resistance.

DOI: 10.7409/rabdim.017.019

¹⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok; marta.wasilewska@pb.edu.pl (✉)

²⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska; w.gardziejczyk@pb.edu.pl

³⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska; p.gierasimiuk@pb.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Właściwości przeciwpoślizgowe odgrywają szczególną rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa ruchu samochodowego na mokrych i wilgotnych nawierzchniach. Są one definiowane jako zdolność do wytworzenia siły tarcia w warunkach wzajemnego poślizgu. Ich miarą jest współczynnik tarcia, który jest ściśle związany z teksturą czyli geometrycznym opisem nierówności nawierzchni drogowych. Tekstura odpowiada za odprowadzenie wody z płaszczyzny kontaktu opony z nawierzchnią. Makrotekstura, która charakteryzuje się nierównościami w zakresie fal o długości 0,5-50 mm, wynika z technologii wykonania górnej warstwy nawierzchni oraz zawartości poszczególnych frakcji w mieszance mineralnej. Natomiast mikrotekstura, czyli nierówności o długości fal poniżej 0,5 mm, jest związana z powierzchnią ziaren grubych oraz z zawartością frakcji poniżej 2 mm w mieszance mineralnej przeznaczonej do warstwy ścieralnej. Makrotekstura jest określana za pomocą wartości *MTD* (ang. *Mean Texture Depth*) ustalonej metodą objętościową lub wartości *MPD* (ang. *Mean Profile Depth*) wyznaczonej metodą profilometryczną. Mikrotekstura jest oceniana w sposób pośredni na podstawie wskaźnika polerowalności *PSV* (ang. *Polished Stone Value*) kruszyw grubych przeznaczonych do warstwy ścieralnej oraz za pomocą urządzeń do pomiaru współczynnika tarcia przy niskich prędkościach poślizgu (10-20 km/h) w rzeczywistych warunkach [1, 2].

Pod wpływem ruchu samochodowego oraz czynników atmosferycznych mikrotekstura i makrotekstura ulegają zmianom. Największa intensywność zmian współczynnika tarcia jest rejestrowana w początkowym etapie użytkowania nawierzchni drogowych i dopiero po tym okresie następuje jego ustabilizowanie się. Wówczas rejestrowane zmiany współczynnika tarcia mają charakter sezonowy w zależności od pory roku i strefy klimatycznej [3, 4]. Dotyczy to zarówno nawierzchni asfaltowych jak i nawierzchni betonowych. Ustabilizowanie się współczynnika tarcia na pewnym poziomie na nawierzchniach asfaltowych następuje dopiero po zdarciu warstewki asfaltu, a następnie wypolerowaniu wystających ziaren kruszyw grubych. Badania wykazały, że osiągnięcie takiego stanu jest uzależnione od typu mieszanki mineralno-asfaltowej, kategorii ruchu oraz elementu układu drogowego (skrzyżowanie, przejście dla pieszych, pasy włączania i wyłączania itp.) [5]. W przypadku nawierzchni betonowych zachodzące zmiany są uwarunkowane także techniką teksturowania ich powierzchni.

Zgodnie z [6] w Polsce mogą być stosowane następujące techniki teksturowania nawierzchni betonowych: przeciąganie tkaniny jutowej, przeciąganie poprzeczne szczotką, rowkowanie poprzeczne wykonywane na świeżej mieszance

1. INTRODUCTION

The role of skid resistance of road pavements in ensuring safety of road traffic becomes particularly important when such surfaces become moist or wet. Skid resistance is defined as the frictional resistance at the interface between a vehicle tyre and the road surface. The measure of skid resistance is the friction coefficient, closely related to the surface texture, i.e. geometric description of its irregularities. The surface texture ensures draining water from the tire-pavement interface area. Deviations from a flat plane having wavelength between 0.5 and 50 mm are referred to as macrotexture and its characteristics defined by the upper layers technology and by the particle size distribution of the aggregate mix used in its production. Wavelength below 0.5 mm are referred to as microtexture which is defined by the resistance to polishing of coarse aggregate and the content of particles smaller than 2 mm in the aggregate mix used for the wearing course. Macrotexture parameters include Mean Texture Depth (*MTD*) determined by the volumetric method and Mean Profile Depth (*MPD*) derived from profilometric analysis. Microtexture is assessed indirectly based on Polished Stone Value (*PSV*) determined for coarse aggregate used for the wearing course and by measuring the friction coefficient at low slip speed (10-20 km/h) in-situ [1, 2].

Both microtexture and macrotexture evolve under the effect of traffic and weathering. The most rapid evolution of the friction coefficient occurs in the early life of using road pavements after which it stabilizes. In the latter period changes to the friction coefficient are of seasonal nature and depend on the season of the year and on the climate zone [3, 4]. This is typical of both asphalt and Portland cement concrete (PCC) pavements. On asphalt pavements the value of friction coefficient levels off at a certain level when the bitumen film has been removed and the surfaces of protruding large particles of coarse aggregate become polished. The experiments show that the time to reach this state depends on the asphalt mix design, the traffic category and site location (intersection, pedestrian crossing, acceleration/deceleration lane, etc.) [5]. Another factor in case of PCC pavements is the surface texturing technique.

According to [6] the following texturing techniques are officially approved for use in Poland: burlap drag, transverse broom drag, transverse tine texturing (performed on fresh concrete) and exposed aggregate concrete (EAC). The first three techniques do not ensure satisfactory durability on heavy traffic roads [7]. Diamond saw cutting methods (which improve both macrotexture and microtexture) are considered the most effective texturing treatment for

betonowej oraz metoda odkrytego kruszywa. Pierwsze trzy rozwiązania nie pozwalają na osiągnięcie trwałego efektu w przypadku dróg obciążonych ruchem pojazdów ciężarowych [7]. Za najbardziej skuteczne techniki teksturowania nawierzchni betonowych na drogach szybkiego ruchu uważane są metody z użyciem tarcz diamentowych, które zapewniają zarówno poprawę makrotekstury, jak i mikrotekstury [7-10]. Takie rozwiązania nie były dotychczas stosowane w Polsce. Aktualne zapisy w specyfikacjach technicznych w przypadku dróg szybkiego ruchu z nawierzchnią betonową wskazują jedną metodę teksturowania polegającą na chemicznym odkryciu kruszywa [11]. Uzasadnieniem stosowania takiego rozwiązania jest twierdzenie, że uzyskuje się bardzo dobre właściwości przeciwoślizgowe, korzystnie wpływające na bezpieczeństwo ruchu. W tej technologii do 2023 roku planuje się wybudowanie w Polsce ponad 800 km dróg krajowych.

Teksturowanie metodą odkrytego kruszywa zostało opracowane w latach osiemdziesiątych XX wieku w Austrii. Polega ono na wykorzystaniu zjawiska opóźnionej hydratacji cementu przez zastosowanie odpowiednich środków chemicznych na powierzchni świeżo ułożonej górnej warstwy betonowej. Niezwiązana zaprawa cementowa po kilku/kilkunastu godzinach, w zależności od warunków atmosferycznych, jest usuwana szczotkami mechanicznymi lub wodą pod ciśnieniem [12, 13]. Poprawnie wykonana tekstura powierzchni powinna charakteryzować się odpowiednią ilością grubych ziaren kruszywa (około 50-60 na powierzchni 25 cm^2). Osiągnięcie takiego efektu wymaga produkcji mieszanki betonowej na górną warstwę składającej się z dwóch frakcji: kruszywa drobnego 0/1 lub 0/2 (około 30%) i kruszywa grubego 4/8 lub 5/8 (około 70%) [14, 15]. Zapewni to nieciągłość uziarnienia mieszanki mineralnej i uzyskanie optymalnej ilości ziaren kruszywa z odkrytą powierzchnią.

Brak powyższych zapisów w specyfikacjach technicznych przyczynia się do trudności z uzyskaniem odpowiedniej tekstury. W konsekwencji może to prowadzić do niedostatecznego (Rys. 1a) lub nadmiernego odsłonięcia kruszyw grubych i ich ubytków (Rys. 1b). Innym czynnikiem wpływającym na teksturę jest m.in. kształt kruszywa grubego określany przy pomocy wskaźnika płaskości FI [16] lub wskaźnika kształtu SI [17]. Nieodpowiednia makrotekstura, ubytki ziaren mają wpływ na trwałość i hałaśliwość nawierzchni betonowej [18]. Zgodnie z doświadczeniami austriackimi stosując kruszywo drobne 0/1 w mieszance betonowej można także uzyskać niższe poziomy hałasu w porównaniu do mieszanki betonowej z kruszywem drobnym 0/2 [15].

expressways [7-10]. They have not been used in Poland so far. Exposing of aggregate with the use of chemical agents is the only texturing method that is specified in Poland for the pavements designed for expressways [11]. The rationale behind choosing this method is the conviction that it ensures very good skid resistance improving the safety of road traffic. This method is planned to be used on over 800 km of national roads to be built by the year 2023.

The EAC was developed in the 1980s in Austria. In this method the process of cement hydration is retarded by applying appropriate retarding admixtures on the surface of fresh concrete. After a few or up to over a dozen hours (depending on the weather conditions) the not-hydrated cement mortar is removed with mechanical brushes or washed off with water jet [12, 13]. The surface is considered to have positive texture if it contains an adequate number of coarse aggregate particles (ca. 50-60 per 25 cm^2). In order to obtain this effect the aggregate mix used for the upper layer production should consist of two fractions: 0/1 or 0/2 as fine aggregate (ca. 30%) and 4/8 or 5/8 as coarse aggregate (about 70%) [14, 15]. This will ensure open grading of the mineral mix and optimum number of particles with exposed surface.

Absence of above mentioned requirements in specifications can cause problems in obtaining appropriate texture. These quality problems can include both insufficient (Fig. 1a) or excessive exposure, as well as loss of coarse aggregate grains (Fig. 1b). Other factors influencing the texture quality include the shape of coarse aggregate grains described by the flakiness index FI [16] or shape index SI [17]. Inadequate macrotexture and loss of grains affect the pavement durability and increase the level of tyre-pavement noise [18]. According to Austrian experiences 0/1 grading of fine aggregate lowers noise levels compared to 0/2 grading [15].

Studies comparing the skid resistance of PCC pavements depending on the texturing technique have not been carried out in Poland so far. The different codes and guidelines specify different threshold values of friction coefficient [19-21]. Besides, they do not provide a clear reference to the wearing course technology. According to [19] the pavement should ensure the required friction coefficient at the time of opening for traffic and after 4-8 weeks of trafficking. The same threshold of friction coefficient is specified for the time of opening and after 4-8 weeks of trafficking. However, measurements showed considerable variation in the skid resistance during service. Bearing this in mind, the objective of this study is to investigate the evolution of early-life skid resistance of PCC pavements on the basis of field measurements of macrotexture and microtexture parameters.

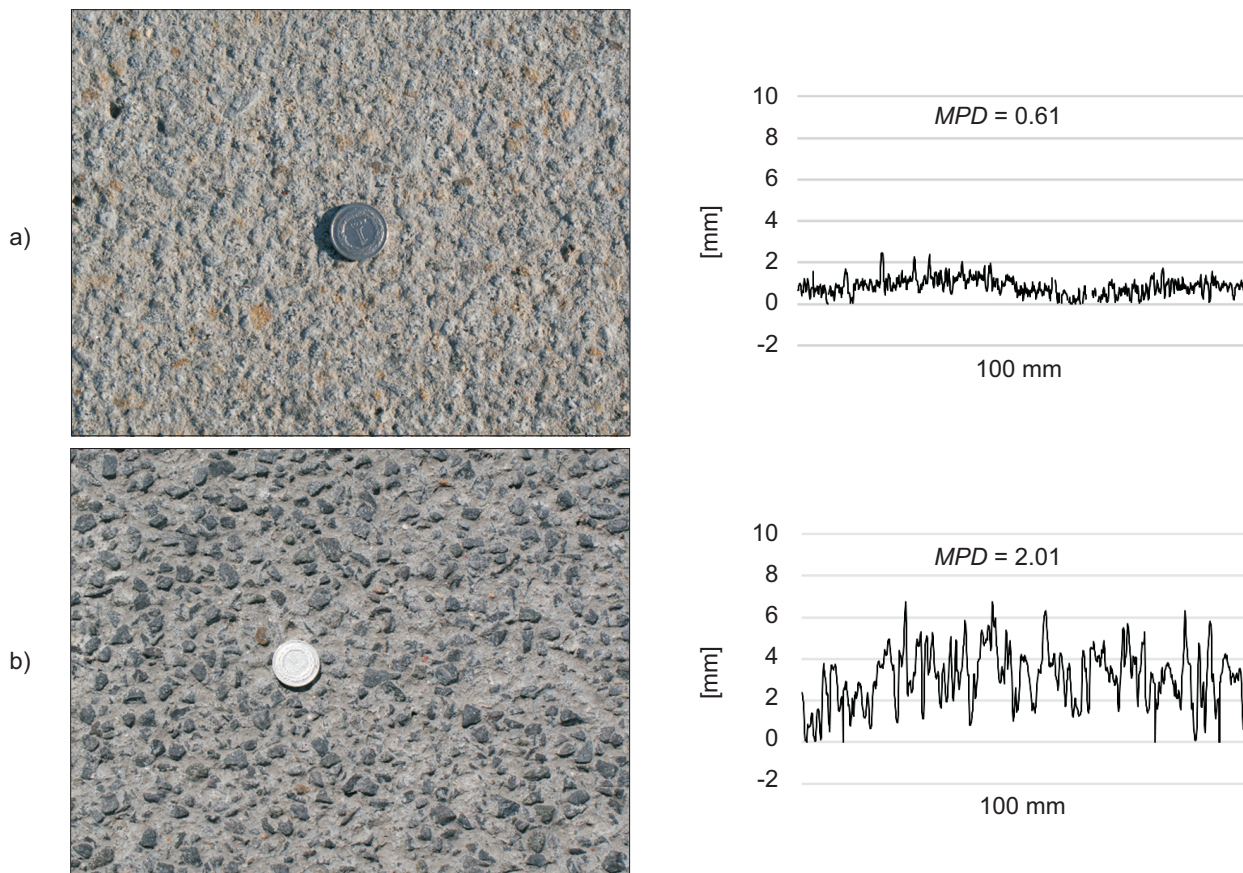


Fig. 1. Surfaces of upper layer and their texture profiles: a) insufficiently exposed coarse aggregate, b) surface with loss of coarse aggregate particles

Rys. 1. Powierzchnie górnej warstwy betonowej wraz z profilami nierówności: a) niedostatecznie odsłonięte ziarna kruszywa grubego, b) ubytki ziaren kruszywa grubego

Dotychczas w Polsce nie były prowadzone szczegółowe badania porównawcze dotyczące oceny właściwości przeciwoślizgowych nawierzchni betonowych teksturowanych różnymi technikami. Minimalne wartości miarodajnego współczynnika tarcia podane w poszczególnych dokumentach prawnych i wytycznych technicznych mają różne wartości [19-21]. Brak jest przy tym jednoznacznego odniesienia do rozwiązań technologicznych górnych warstw nawierzchni. Zgodnie z [19] wykonana nawierzchnia musi spełniać wymagania w zakresie właściwości przeciwoślizgowych przed oddaniem nawierzchni do ruchu oraz po 4-8 tygodniach od oddania jej do ruchu. Minimalne wartości współczynnika tarcia, które należy zagwarantować przy danej prędkości pomiarowej są takie same, zarówno przed oddaniem do ruchu jak i po 4-8 tygodniach użytkowania nawierzchni. Wstępnie przeprowadzone pomiary współczynnika tarcia wykazywały jednak znaczne różnice w jego wartościach wraz z upływem okresu eksploatacji drogi. Mając na uwadze ten fakt, celem artykułu jest ocena zmian

2. RESEARCH PROGRAM

The tests were carried out on two sections of expressway No. S8 located in the Łódź province of Poland, named Section A and Section B. The road was opened to traffic in 2014. The texture of upper layer of PCC pavement with maximum grain size 8 mm was made as EAC. Two aggregate types were used: basalt aggregate (Fig. 2) on the Section A and gabbro aggregate (Fig. 3) on the Section B of $PSV = 53$ and $PSV = 54$ respectively. These two sections were constructed by the same Contractor who used the same chemicals for texturing. Table 1 presents particle size distributions of the aggregates used to produce the mixes. Note that the content of 4/8 fraction does not meet the requirements mentioned in [14, 15] because of the necessity to use three fractions of aggregate as specified.

For estimation of skid resistance properties the Circular Tester Meter (CTM) and the Dynamic Friction Tester (DFT) were used – Fig. 4. Such measurements were carried out

właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni betonowych w początkowym okresie ich użytkowania z wykorzystaniem uzyskanych wyników z pomiarów makrotekstury i mikro-tekstury.

2. PROGRAM BADAŃ

Pomiary przeprowadzono na dwóch odcinkach testowych A i B na drodze ekspresowej S8 w województwie łódzkim. Nawierzchnia została oddana do ruchu w 2014 roku. Tekstura górnej warstwy betonowej o maksymalnym wymiarze kruszywa grubego 8 mm, została uzyskana przy zastosowaniu metody odkrytego kruszywa. Na odcinku A zastosowano kruszywo bazaltowe o wskaźniku polerowalności $PSV = 53$ (Rys. 2), a na odcinku B kruszywo gabbrowe o wskaźniku $PSV = 54$ (Rys. 3). Oba odcinki zostały wykonane przez jednego wykonawcę z zastosowaniem tych samych środków chemicznych. W Tabl. 1 przedstawiono uziarnienia mieszanek mineralnych. Należy dodać, że zawartość frakcji 4/8 nie spełnia wymagań o których mowa w [14, 15] m.in. z uwagi na konieczność zastosowania trzech frakcji kruszywa w mieszance betonowej zgodnie z wymaganiami zawartymi w specyfikacjach technicznych.

Do oceny właściwości przeciwpoślizgowych wykorzystano zestaw urządzeń: CTM (ang. *Circular Tester Meter*) i DFT (ang. *Dynamic Friction Tester*) – Rys. 4. Takie pomiary były także prowadzone na nawierzchniach asfaltowych [22-24]. CTM jest laserowym urządzeniem do oceny makrotekstury zgodnie z ASTM E2157 [25]. Makrotekstura jest mierzona za pomocą średniej głębokości profilu *MPD* nawierzchni drogowej. Profil jest otrzymywany przez laserowy czujnik przemieszczeń CCD, który porusza się po obwodzie okręgu o promieniu 142,0 mm. Warunkiem przeprowadzenia pomiarów jest sucha i czysta nawierzchnia. Po przeprowadzeniu pomiaru urządzeniem CTM, dokładnie na tej samej powierzchni jest przeprowadzany pomiar współczynnika tarcia urządzeniem DFT zgodnie z ASTM E1911 [26]. DFT składa się z dwóch dysków, które są ze sobą połączone sprężyną z czujnikiem. Na dolnym dysku są zamocowane trzy gumowe ślizgacze. Podczas pomiaru dyski są doprowadzone do prędkości 80 km/h. Przed opuszczeniem dysków na badaną powierzchnię ze specjalnego zespołu dysz wypływa woda. Wówczas dyski zostają opuszczone i następuje pomiar współczynnika tarcia. Pomiar był wykonywany przy prędkości startowej 80 km/h, dla której był wyznaczany współczynnik tarcia *DFT20* przy prędkości poślizgu 20 km/h, *DFT40* przy 40 km/h i *DFT60* przy 60 km/h. Zgodnie z [27] za miarę mikrotekstury przyjęto współczynnik tarcia *DFT20*.



Fig. 2. Exposed aggregate concrete produced using basalt aggregate on the Section A

Rys. 2. Górna warstwa betonowa na odcinku A z kruszywem bazaltowym



Fig. 3. Exposed aggregate concrete produced using gabbro aggregate on the Section B

Rys. 3. Górna warstwa betonowa na odcinku B z kruszywem gabbrowym

also on asphalt pavements [22-24]. CTM is a laser-based device used to measure the macrotexture according to ASTM E2157 [25]. Macrotexture determination is based on the field measurements of the Mean Profile Depth *MPD* of pavement. The profile is obtained with a laser displacement sensor CCD travelling in a circle of 142.0 mm radius. The test surface must be dry and clean. Measurement with DFT device is followed by the measurement with CTM and they were performed on the same surface according to the procedure defined in ASTM E1911 [26]. DFT is built of two discs connected by a spring incorporating a sensor. Three rubber pads are attached to the lower disc. During measurement the discs accelerate up to 80 km/h. Before lowering them to the test surface, water is applied on the surface through specially designed nozzles. Next the discs are lowered and the measurement is carried out. The test speed was set at 80 km/h and friction coefficients were measured at the speeds of 20 km/h *DFT20*, 40 km/h *DFT40*



Fig. 4. The CTM and the DFT devices
Rys. 4. Zestaw urządzeń CTM i DFT

Pomiary parametru MPD i współczynnika tarcia $DFT20$ przeprowadzono:

- po dwóch (2 tyg.) i sześciu (6 tyg.) tygodniach po wykonaniu nawierzchni (odcinek A),
- po trzech miesiącach (3 miesiące) od oddania nawierzchni do ruchu (odcinek A i B),
- po szesnastu miesiącach (16 miesięcy) od oddania nawierzchni do ruchu (odcinek A i B).

Na odcinku A przed oddaniem do ruchu punkty pomiarowe rozmieszczono co 50 m. W przypadku badań realizowanych na nawierzchniach „pod ruchem” w celu bezpiecznego wykonania pomiarów urządzeniami CTM i DFT było wymagane „zamknięcie” pasa drogowego. Wówczas punkty pomiarowe rozmieszczono co 100 m, w prawym (P) i lewym (L) śladzie kół samochodowych prawego pasa ruchu. W każdym z punktów pomiarowych wykonano po trzy powtórzenia.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

3.1. ZMIANY MAKROTEKSTURY I MIKROTEKSTURY W OKRESIE UŻYTKOWANIA NAWIERZCHNI

W Tabl. 2 i 3 przedstawiono średnie wyniki z trzech pomiarów parametrów MPD i $DFT20$ w punktach pomiarowych w lewym (L) i prawym (P) śladzie kół samochodowych prawego pasa ruchu w poszczególnych okresach użytkowania na odcinkach A i B. W powyższych tablicach zamieszczono również statystyki opisowe (średnia, minimum Min , maksimum Max , odchylenie standardowe STD , współczynnik zmienności V). Zmiany parametru MPD i współczynnika tarcia $DFT20$ w okresie użytkowania zostały zaprezentowane na Rys. 5 i 6.

and 60 km/h $DFT60$. According to [27] the value of $DFT20$ was taken as representative for the purpose of microtexture evaluation.

The MPD and $DFT20$ measurements were taken at the following time intervals:

- two (2) and six (6) weeks after pavement construction (Section A),
- three (3) months after opening the road for traffic (Section A and Section B),
- sixteen (16) months after opening the road for traffic (Section A and Section B).

On the Section A the test spots for measurements before opening the road were spaced at 50 m intervals. Conducting CTM and DFT measurements during service required lane closure for safety reasons. The test spots were located in the slow lane at 100 m intervals in the right (P) and left (L) wheel tracks. The measurements were repeated three times at each test spot.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. IN-SERVICE EVOLUTION OF THE MACROTEXTURE AND MICROTEXTURE

Tables 2 and 3 show mean values of MPD and $DFT20$ calculated from three values measured at each test spot in the left and right wheel track in the right lane after the specified periods of trafficking of the Section A and Section B. The above-mentioned tables include also descriptive statistics (mean value, minimum Min , maximum Max , standard deviation STD , coefficient of variation V). The in-service evolutions of MPD and $DFT20$ are presented in Fig. 5 and Fig. 6.

Both the measured values of MPD and the calculated statistics show the lack of any significant changes to the macrotexture in the analysed period on both Sections: A and B. It has been determined that MPD has the mean value over 1.20 mm. However, the value of $DFT20$ changed considerably in that period. It means that the early-life evolution of skid resistance of EAC pavements with the changes to the microtexture of protruding particles of coarse aggregate.

Because the results of measurements were taken on the Section A in the first two months of trafficking it was possible to obtain details of the phenomena that occurred in pavement in that period. The lowest values of $DFT20$ that were obtained two weeks after placement indicate the effect of increased slipperiness after construction which so

Uzyskane wartości *MPD* i ich statystyki wskazują, że w analizowanym okresie nie zarejestrowano istotnych zmian w makroteksturze nawierzchni na odcinkach A i B. Ustalono, że średnia wartość parametru *MPD* jest wyższa od 1,20 mm. Istotne zmiany zarejestrowano natomiast w przypadku współczynnika tarcia *DFT20*. Oznacza to, że na nawierzchniach betonowych z odkrytym kruszywem zmiany właściwości przeciwpoślizgowych w początkowym okresie użytkowania są związane ze zmianami mikrotekstury powierzchni wystających ziaren kruszywa grubego.

far was considered typical of asphalt pavements only. The surface texture of the top layer of concrete was obtained by surface application of retarder to slow down the process of cement hydration. After exposing the aggregate on the road surface, straight-chain alkane-based curing agent was applied to control evaporation of water. The agent was still present on the surface of protruding particles at the time of taking measurements, thus affecting the friction coefficients. After six weeks an increase in *DFT20* was observed. However, spreading of results in the ranges of 0.20-0.42 (after 2 weeks) and 0.42-0.68 (after 6 weeks) indicate that removal of the curing agent has not finished at that time and proceeded at very different rates, depending on the action weathering and level of the site traffic.

Table 1. Aggregate particle-size distribution
Tablica 1. Uziarnienie mieszanki mineralnej

Section / Odcinek	Sieve size / Sito [mm]								
	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16
	% Passing the sieve / Przesiew [%]								
A	0.7	1.4	4.6	14.5	24.7	33.2	51.1	96.7	100
B	0.5	1.2	4.4	14.6	25.2	33.1	49.5	95.6	100

Table 2. Results of *MPD* measurements [mm] taken on the test sections A and B including descriptive statistics
Tablica 2. Wyniki pomiarów *MPD* [mm] na odcinkach A i B wraz ze statystykami opisowymi

No. Lp.	Section / Odcinek A						Section / Odcinek B			
	2 weeks / tyg.	6 weeks / tyg.	3 months / miesiące	16 months / miesięcy	3 months / miesiące	16 months / miesięcy	3 months / miesiące	16 months / miesięcy	3 months / miesiące	16 months / miesięcy
1	1.40	1.03	1.21	1.04	1.20	1.21	1.21	1.16	1.36	1.23
2	1.10	1.41	1.06	1.21	1.28	1.19	1.18	1.17	1.17	1.17
3	1.32	1.31	1.09	1.25	1.29	1.25	1.02	1.06	1.14	1.25
4	1.50	0.92	1.31	1.31	1.18	1.31	1.26	1.23	1.24	1.19
5	1.11	1.52	1.20	1.42	1.32	1.32	1.27	1.06	1.26	1.27
6	1.08	1.54	1.25	1.13	1.22	1.10	1.18	1.04	1.08	1.17
7	1.38	1.18	1.47	1.32	1.43	1.35	1.12	1.25	1.48	1.29
8	1.48	1.32	1.33	1.26	1.37	1.36	1.32	1.24	1.05	1.03
9	1.31	1.06	1.21	1.30	1.34	1.50	1.26	1.33	1.36	1.49
10	1.28	1.04	1.31	1.28	1.14	1.28	1.28	1.41	1.20	1.27
Mean / Średnia	1.30	1.23	1.24	1.25	1.28	1.29	1.21	1.20	1.23	1.24
Min.	1.08	0.92	1.06	1.04	1.14	1.1	1.02	1.04	1.05	1.03
Max.	1.50	1.54	1.47	1.42	1.43	1.50	1.32	1.41	1.48	1.49
STD	0.154	0.219	0.120	0.106	0.092	0.110	0.089	0.122	0.135	0.117
V [%]	11.90	17.74	9.63	8.46	7.17	8.51	7.37	10.17	10.96	9.47

Z uwagi na wykonanie pomiarów w pierwszych dwóch miesiącach użytkowania na odcinku A była możliwa szczegółowa identyfikacja zjawisk, które zachodziły na nawierzchni w tym okresie. Najniższe wartości współczynnika tarcia *DFT20* po 2 tygodniach od wykonania warstwy

The mean values of *DFT20* determined after six weeks and after three months of trafficking levelled off at the same level (0.54-0.53). It means that at some test points *DFT20* values higher than 0.60 were measured after six weeks of trafficking. It is important to properly determine

świadczą o zjawisku tzw. śliskości powykonawczej, która jak dotąd była utożsamiana tylko z warstwą ścierną wykonaną z mieszanek mineralno-asfaltowych. Tekstura górnej warstwy betonowej została uzyskana na skutek powierzchniowego stosowania środka opóźniającego hydratację cementu. Po odsłonięciu ziaren kruszywa na powierzchni jezdni zastosowano środek pielęgnacyjny na bazie mieszaniny łańcuchowych węglowodorów nasyconych, zapobiegający odparowywaniu wody. Wspomniany środek w czasie pomiarów w tym okresie był wciąż obecny na powierzchni wystających ziaren kruszyw i wpływał na obniżenie współczynnika tarcia. Po 6 tygodniach zarejestrowano wzrost wartości DFT_{20} . Jednak rozrzut wyników od 0,20 do 0,42 (po 2 tygodniach) i od 0,42 do 0,68 (po 6 tygodniach) wskazuje, że proces usuwania środka do pielęgnacji betonu z powierzchni kruszyw wciąż trwał i postępował w bardzo różnym stopniu w zależności od oddziaływania czynników atmosferycznych oraz natężenia przejazdów sprzętu budowlanego.

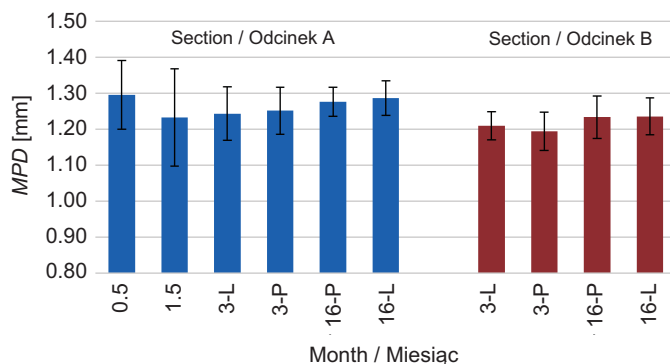


Fig. 5. Mean values of the MPD with 95% confidence interval during in stages of use of the pavement
Rys. 5. Średnie wartości MPD wraz z 95% przedziałem ufności w poszczególnych etapach użytkowania nawierzchni

Średnie wartości DFT_{20} ustalone po 6 tygodniach i po 3 miesiącach użytkowania ustabilizowały się na tym samym poziomie (0,54-0,53). Jednak w niektórych punktach pomiarowych po 6 tygodniach zarejestrowano wartości DFT_{20} wyższe od 0,60. Z powyższych ustaleń wynika jak bardzo ważnym zagadnieniem jest ustalenie momentu ustabilizowania się współczynników tarcia na stałym poziomie. Na długość tego okresu mogą mieć wpływ zarówno warunki atmosferyczne jak i intensywność ruchu. Istotny spadek współczynnika tarcia DFT_{20} odnotowano pomiędzy 3 a 16 miesiącem użytkowania nawierzchni. W przypadku odcinka A wyniósł on około 20%, a na odcinku B – 16%. Współczynniki zmienności V poniżej 10% wskazują na równomierność zachodzących zjawisk na tych odcinkach. Nie odnotowano istotnych różnic pomiędzy wartościami DFT_{20} otrzymanymi w lewym i prawym śladzie pasa ruchu.

the moment at which the friction coefficient stabilizes. The length of that period can be influenced by both weather and by the magnitude of traffic. A significant drop in the value of DFT_{20} was noted in the period between month 3 and month 16 after opening for traffic. The decrease was ca. 20% on the Section A and ca. 16% on the Section B. The values of the coefficient of variation V below 10% indicate consistency of the phenomena that took place on the analysed sections. No significant differences were noted between the values of DFT_{20} obtained in the left and right wheel tracks.

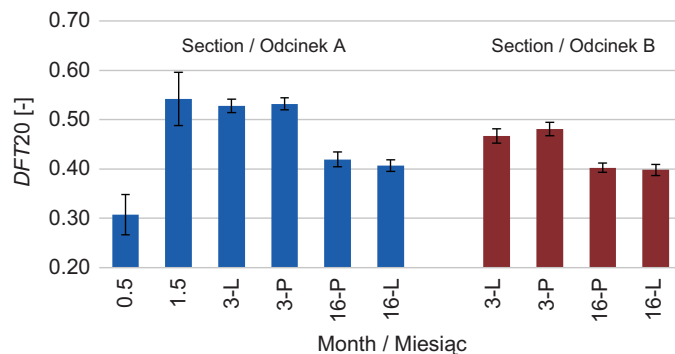


Fig. 6. Mean values of DFT_{20} with 95% confidence interval in stages of use of the pavement
Rys. 6. Średnie wartości współczynnika tarcia DFT_{20} wraz z 95% przedziałem ufności w poszczególnych etapach użytkowania nawierzchni

After opening the road the combined action of tyres, small particles and water has a polishing effect on the protruding particles of aggregate. This polishing action contributes to the evolution of microtexture which in the case of EAC is predominantly related to the polishing resistance of the coarse aggregate in the upper layer. Pavements of this type require specification of coarse aggregate with $PSV \geq 53$. This requirement was satisfied by aggregates used on both sections of pavement under analysis – the Section A (basalt) and the Section B (gabbro). However, it must be noted that it is not very common to find basalt aggregate having such a high value of PSV and simultaneously meeting the remaining physical properties.

The polishing performance is different for each type of rock due to different petrography. Image analysis of the surfaces of aggregates after polishing in accordance with EN1097-8:2009, under integrated digital microscope [28] showed differences that are decisive of the polishing resistance of the aggregates in question (Figs. 7 and 8). Both basalt and gabbro have a well-developed microtexture. Basalt has a semi-crystalline structure. Good resistance to polishing is attributed to fine-grained minerals embedded

Po oddaniu nawierzchni do użytkowania na skutek oddziaływania opon samochodowych, drobnych zanieczyszczeń oraz wody na powierzchni wystających ziaren kruszywa zachodzi zjawisko polerowania. Przyczynia się ono do zmiany mikrotekstury, która w przypadku górnych warstw betonowych teksturowanych metodą odkrytego kruszywa jest związana głównie z odpornością na czynniki polerujące kruszywa grubego. Do tego typu nawierzchni wymagane jest kruszywo grube o wskaźniku $PSV \geq 53$. Na odcinkach A (z kruszywem bazaltowym) i B (z kruszywem gabrowym) zastosowane materiały spełniały to kryterium. Należy przy tym zaznaczyć, że rzadko spotyka się kruszywo bazaltowe o tak wysokim wskaźniku PSV , które jednocześnie spełnia wymagania wobec innych właściwości fizycznych.

Każdy rodzaj skały ze względu na zróżnicowaną charakterystykę petrograficzną inaczej poddaje się polerowaniu. Analiza obrazów pod mikroskopem optyczno-cyfrowym wypolerowanej powierzchni kruszyw zgodnie z PN-EN1097-8:2009 [28], wskazała na różnice które decydują o ich odporności na polerowanie (Rys. 7 i 8). Zarówno bazalt jak i gabbro mają rozwiniętą mikrostrukturę. Bazalt odznacza się strukturą częściowo krystaliczną. Drobne minerały osadzone w szklistej masie skalnej wpływają na dobrą odporność na polerowanie. Natomiast w przypadku gabra jego jawnokrystaliczna, nierównomiernista struktura oraz wtrącenia kalcytowo-kwarcytowe gwarantują wymagany wskaźnik PSV . Szczegółowe opisy zmian w mikroteksturze, które zachodzą na powierzchni gabra w procesie polerowania są podane w pracy [29].

Prawdopodobnie różna charakterystyka petrograficzna skał, która ma istotny wpływ na poddawanie się czynnikom polerującym, jest przyczyną nieznacznych różnic pomiędzy wynikami $DFT20$ na odcinkach A i B po trzech miesiącach od oddania drogi do ruchu. Natomiast po szesnastu miesiącach różnice pomiędzy współczynnikami tarcia otrzymanymi na odcinkach testowych są już nieistotne.

in a glassy matrix. In gabbro, in turn, the required PSV is ensured by holocrystalline structure with calcite/quartzite inclusions. A detailed description of changes in the microtexture on the surface of gabbro during polishing are presented in [29].

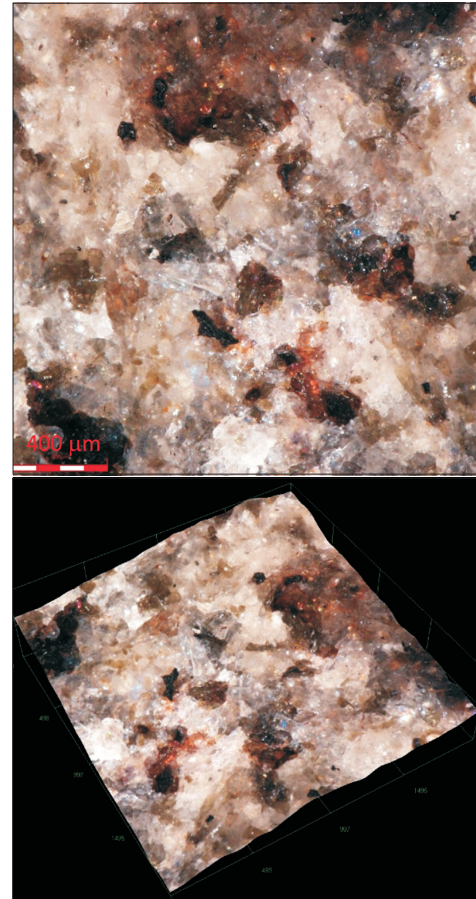


Fig. 7. Surface of basalt aggregate after polishing
Rys. 7. Powierzchnia kruszywa bazaltowego po polerowaniu

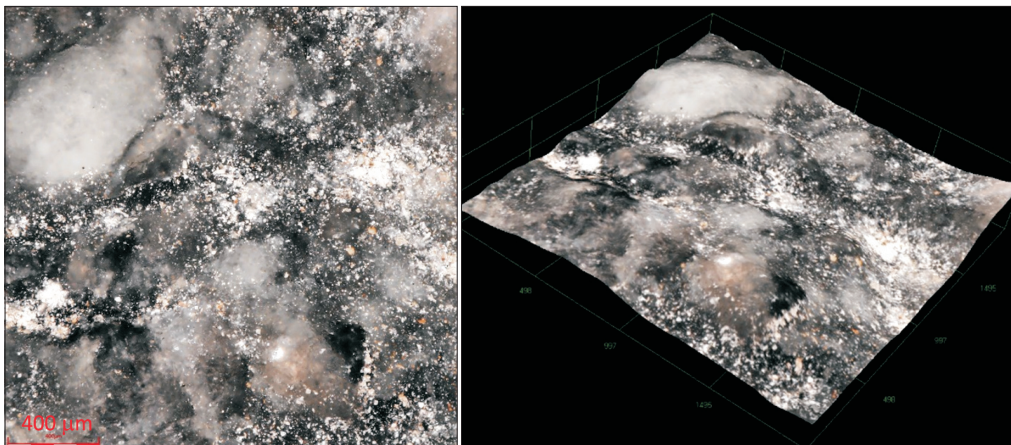


Fig. 8. Surface of gabbro aggregate after polishing
Rys. 8. Powierzchnia kruszywa gabrowego po polerowaniu

3.2. OCENA WŁAŚCIWOŚCI PRZECIWPOŚLIZGOWYCH NA PODSTAWIE WSKAŹNIKA *IFI*

Wykonanie pomiarów za pomocą urządzeń CTM i DFT umożliwia kompleksową ocenę właściwości przeciwpoślizgowych w oparciu o międzynarodowy wskaźnik tarcia *IFI* (ang. *International Friction Index*) zgodnie z ASTM E1960 - 07 [30, 31]. *IFI* jest określany na podstawie dwóch parametrów: referencyjnej liczby prędkości S_p i referencyjnego współczynnika tarcia $F60$. Wartość S_p jest wyznaczana na podstawie pomiaru makrotekstury i obliczana z zależności (1).

$$S_p = a + b \cdot Tx, \quad (1)$$

gdzie:

Tx – makrotekstura określona na podstawie pomiaru *MPD* lub *MTD* [mm],

a, b – stałe kalibracyjne w zależności od pomiaru makrotekstury; w przypadku *MPD*: $a = 14,2$ i $b = 89,7$.

Referencyjny współczynnik tarcia $F60$ jest obliczany z zależności (2):

$$F60 = A + B \cdot FR60, \quad (2)$$

gdzie:

A, B – stałe kalibracyjne w zależności od urządzenia pomiarowego; w przypadku DFTTester $A = 0,081$, $B = 0,732$,

$FR60$ – wartość współczynnika tarcia sprowadzona do prędkości poślizgu 60 km/h, określa się na podstawie zależności (3):

$$FR60 = FRS \cdot \exp(S - 60 / S_p), \quad (3)$$

gdzie:

FRS – współczynnik tarcia przy prędkości poślizgu S ; w przypadku DFT wartość FRS odpowiada wartości $DFT20$ ustalonej przy prędkości poślizgu $S = 20$ km/h.

W Tabl. 4 zamieszczono wartości S_p i $F60$ obliczone na podstawie średnich wartości *MPD* i $DFT20$ w odniesieniu do poszczególnych odcinków. Zarówno wyniki *MPD* (prezentowane wcześniej), jak i wartości referencyjnej liczby prędkości S_p potwierdziły, że w pierwszym okresie eksploatacji drogi nie nastąpiły praktycznie żadne zmiany w makroteksturze nawierzchni. Oznacza to, że różnice w wartościach $F60$ w poszczególnych etapach pomiarów zależały głównie od zmian zachodzących w mikroteksturze ziaren kruszywa grubego w warstwie ścieralnej nawierzchni drogowej. Najwyższe wartości $F60$ otrzymano przed oddaniem nawierzchni do

The observed slight differences between the $DFT20$ values measured after three months of trafficking on the Sections A and B respectively are quite probably due to the different petrographic characteristics of the two aggregates, having a considerable influence on the polishing performance. After sixteen months of trafficking these differences were no longer significant.

3.2. EVALUATION OF THE SKID RESISTANCE ON THE BASIS OF INTERNATIONAL FRICTION INDEX *IFI*

CTM and DFT testing enables a comprehensive evaluation of the skid resistance of pavements on the basis of the International Friction Index *IFI* as per ASTM E1960 - 07 [30, 31]. The value of *IFI* is composed of two parameters: speed constant S_p and calibrated friction number $F60$. The value of S_p is calculated with equation (1) relating it to the macrotexture determination:

$$S_p = a + b \cdot Tx, \quad (1)$$

where:

Tx – macrotexture obtained from *MPD* or *MTD* measurements [mm],

a, b – calibration constants depending on the adopted macrotexture measurement method (*MPD* in this case): $a = 14.2$ and $b = 89.7$.

The calibrated friction number $F60$ is calculated using equation (2):

$$F60 = A + B \cdot FR60, \quad (2)$$

where:

A, B – calibration constants specific to the measuring equipment, $A = 0.081$ and $B = 0.732$ for DFT,

$FR60$ – measured value of friction adjusted to the slip speed of 60 km/h, calculated with formula (3).

$$FR60 = FRS \cdot \exp(S - 60 / S_p), \quad (3)$$

where:

FRS – is the friction measured by the equipment at slip speed S ; for DFT FRS corresponds to the value of $DFT20$ determined at slip speed of $S = 20$ km/h.

Table 4 gives the values S_p and $F60$ calculated from the mean values of *MPD* and $DFT20$ for the respective sections. Both the values of *MPD* (presented above) and the values of calibrated speed S_p confirm that in the initial phase of trafficking the changes to the pavement macrotexture were almost non-existent. Hence, the differences in the value of $F60$ between the test cycles depended

ruchu (po 6 tygodniach od wykonania) i po trzech miesiącach jej użytkowania. Po szesnastu miesiącach użytkowania nawierzchni właściwości przeciwpoślizgowe ustabilizowały się na tym samym poziomie.

Table 4. Values of S_p and $F60$ Tablica 4. Wartości S_p i $F60$

Section / Odcinek	Period / Okres	Left wheel tracks / Lewy ślad kół (L)		Right wheel tracks (R) / Prawy ślad kół (P)	
		S_p	$F60$	S_p	$F60$
A	Two weeks after placement Po 2 tygodniach po wykonaniu	130.81	0.25	–	–
	Six weeks after placement Po 6 tygodniach po wykonaniu	124.53	0.37	–	–
	After three months of trafficking Po 3 miesiącach po oddaniu do ruchu	125.43	0.36	126.33	0.36
	After sixteen months of trafficking Po 16 miesiącach po oddaniu do ruchu	129.02	0.31	129.91	0.30
B	After three months of trafficking Po 3 miesiącach po oddaniu do ruchu	122.74	0.33	121.84	0.33
	After sixteen months of trafficking Po 16 miesiącach po oddaniu do ruchu	124.53	0.30	125.43	0.29

Z uwagi na brak w Polsce kryteriów do oceny właściwości przeciwpoślizgowych ustalonych przy wykorzystaniu urządzeń DFT i CTM, uzyskane wyniki porównano z klasyfikacją opartą o wartości $F60$, opracowaną w ramach projektu badawczego zrealizowanego w Stanach Zjednoczonych [7]. Projekt ten dotyczył wpływu metody teksturowania powierzchni na hałaśliwość i właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni betonowych. Zgodnie z tą klasyfikacją, uwzględniając klasę techniczną drogi, prędkość pojazdów, natężenie ruchu oraz charakterystykę elementów układu drogowego (częstość hamowania i przyspieszania – skrzyżowania, łącznice, pasy włączeń i wyłączeń itp.), wyróżnia się pięć kategorii – od A (najwyższej) do E (najniższej).

Na podstawie obliczonych wartości $F60$ nawierzchnie na odcinkach A i B, po szesnastu miesiącach użytkowania, można zaliczyć do kategorii C ($F60$ od 0,280 do 0,319), według klasyfikacji ustalonej w Stanach Zjednoczonych. Nawierzchnia zakwalifikowana do kategorii C spełnia wymagania w odniesieniu do dróg:

- o natężeniu ruchu poniżej 5000 pojazdów/dobę, przy występowaniu łuków poziomych o małych promieniach i na odcinkach o dużym pochyleniu podłużnym oraz w miejscach ze zwiększoną liczbą manewrów hamowania i przyspieszania,
- o natężeniu od 5000 do 25000 pojazdów/dobę, na odcinkach z małą częstotliwością hamowania i przyspieszania, przy prędkości projektowej powyżej 72 km/h,

mostly on the changes in the microtexture of the coarse aggregate particles in the wearing course of pavement. The lowest values of $F60$ were obtained in measurements taken just before opening the road (that is six weeks after placement) and after three months of trafficking. After sixteen months of trafficking the skid resistance values have levelled off at the same level.

Due to lack of Polish skid resistance classification systems on the basis DFT and CTM results, the obtained values were compared to the rating system based on the $F60$ number developed in the U.S. for the needs of a different research project [7]. The objective of the project was to examine the effect of different texturing techniques on the noise and skid-resistance performance of concrete pavements. This classification identifies five friction design categories, from A (the highest friction demand) to E (the lowest friction demand) depending on the road design standard, speed designations, traffic category and site location (frequency of braking and acceleration manoeuvres – intersections, slip, acceleration and deceleration lanes, etc.).

In this classification, taking the $F60$ values obtained on Sections A and B after sixteen months of trafficking, the pavements fall in category C ($F60$ range of 0.280-0.319). A category C pavement is suitable for roads with the following design parameters:

- level of traffic below 5000 veh./day, curves with small radii/steep slopes, high frequency of braking and acceleration manoeuvres,
- 5000-25000 veh./day, low frequency of braking and acceleration manoeuvres and design speed over 72 km/h,
- 5000-25000 veh./day, high frequency of braking and acceleration manoeuvres and design speed below 72 km/h,

- o natężeniu od 5000 do 25000 pojazdów/dobę, na odcinkach z dużą częstotliwością hamowania i przyspieszania, przy prędkości projektowej poniżej 72 km/h,
- o natężeniu powyżej 25000 pojazdów/dobę jedynie na odcinkach o niskich prędkościach projektowych, gdzie ruch drogowy jest płynny (bez łuków o małych promieniach i bez dużych pochyleń podłużnych).

Badania prowadzone w Stanach Zjednoczonych wykazały, że wartości $F60$ otrzymane na nawierzchniach teksturowanych tarczami diamentowymi zostały zaklasyfikowane pod względem poziomu właściwości przeciwpoślizgowych do najwyższej kategorii A [7].

4. WNIOSKI

Znajomość parametrów charakteryzujących teksturę nawierzchni jest bardzo istotna, gdyż pozwala na kompleksową ocenę właściwości przeciwpoślizgowych, a także na ocenę bezpieczeństwa ruchu samochodowego. Najbardziej znaczące zmiany w zakresie wartości współczynnika tarcia zachodzą bezpośrednio po oddaniu nawierzchni do użytkowania. Wykazano, że w przypadku nawierzchni betonowych z odkrytym kruszywem zmiany właściwości przeciwpoślizgowych w początkowym okresie użytkowania drogi są związane jedynie z mikroteksturą ziaren kruszywa grubego.

Najniższe wartości współczynnika tarcia $DFT20$ zanotowano w pierwszych tygodniach po wykonaniu nawierzchni, a współczynniki jego zmienności przekraczały 10%. Jest to następstwem zastosowania środka chemicznego do pielęgnacji betonu i jego pozostałości na odkrytych ziarnach kruszywa grubego. Na skutek czynników atmosferycznych i ruchu samochodowego środek chemiczny był systematycznie usuwany z powierzchni ziaren, a współczynnik tarcia osiągał wartości zdecydowanie wyższe. Fakt ten powinien znaleźć odzwierciedlenie w obowiązujących dokumentach technicznych.

Na podstawie porównania wyników otrzymanych na badanej drodze S8, za pomocą urządzeń CTM i DFT, z klasyfikacją opracowaną w Stanach Zjednoczonych stwierdzono, że badane nawierzchnie spełniają wymagania stawiane klasie C. Oznacza to, że wykonane nawierzchnie spełniają wymogi dla dróg o natężeniu od 5000 do 25000 pojazdów/dobę, przy małej częstotliwości hamowania i przyspieszania, przy prędkości projektowej powyżej 72 km/h.

Wyniki pomiarów i ich analiza wskazują na potrzebę doprecyzowania w naszym kraju przepisów technicznych związanych z wymaganiami w odniesieniu do właściwości przeciwpoślizgowych. Wymagania takie powinny uwzględniać nie tylko klasę techniczną drogi, ale także elementy przekroju

- over 25000 veh./day, low design speed and steady flow of traffic (without small radii curves and steep gradients).

According to the tests performed in the U.S. the sections with diamond saw-cut textures fall in the highest friction category A [7].

4. CONCLUSIONS

The parameters describing the texture of pavement are very important for a comprehensive assessment of its skid resistance and for the road traffic safety evaluation. The most significant changes in friction occur in the initial period of operation. In this paper it is demonstrated that early-life evolution of skid resistance of EAC pavement are connected solely with the changes to the microtexture of protruding particles of coarse aggregate.

The lowest values of the coefficient of friction $DFT20$ were obtained in the first weeks after pavement construction with the coefficient of variation exceeding 10%. This is attributed to the residue of curing agent remaining on the exposed grains of aggregate. The agent is gradually removed by weathering and by traffic, resulting in remarkably higher values of the coefficient of friction. This fact should be considered in the specifications.

Taking the results from CTM and DFT devices obtained on road S8 and using a classification system developed in the U.S. the analysed pavements were found to meet the category C requirements. This makes them suitable for roads with the level of traffic in the range of 5000-25000 veh./day with small frequency of braking and acceleration events and the design speed over 72 km/h.

The measurement results and their analysis indicate a need to implement in the Polish codes more specific requirements relating to the skid-resistance performance of pavements. Besides the design standard these requirements should cover also the road cross-section and the longitudinal profile parameters, level of traffic and its characteristics and site location (intersection, acceleration and deceleration lanes, pedestrian crossing).

SUPPLEMENTARY INFORMATION

This study was performed under the research project No. S/WBiIS/1/2015 at the Białystok University of Technology and funded from the scientific development fund of the Polish Ministry of Science and Higher Education.

podłużnego i poprzecznego, natężenie ruchu i jego charakter oraz elementy układu drogowego (skrzyżowanie, pas włączania, wyłączania, przejścia dla pieszych).

INFORMACJE DODATKOWE

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WBiIS/1/2015 w Politechnice Białostockiej i sfinansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego ze środków przeznaczonych na naukę.

PODZIĘKOWANIE

Autorzy pragną podziękować pracownikom firmy Budimex S.A. za pomoc przy wykonywaniu pomiarów właściwości przeciwpoślizgowych na nawierzchniach betonowych z odkrytym kruszywem oraz cenne uwagi nt. praktycznych aspektów budowy nawierzchni w tej technologii.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Gardziejczyk W.*: Tekstura nawierzchni drogowych – metody pomiaru, wskaźniki oceny i jej wpływ na hałas toczenia. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **1**, 2, 2002, 5-29
- [2] *Hall J.W., Smith K.L., Titus-Glover L., Wambold J.C., Yager T.J., Rado Z.*: Guide for Pavement Friction, Final Report for NCHRP Project 01-43, 2009
- [3] *Kokkalis A.G., Panagouli O.K.*: Fractal evaluation of pavement skid resistance variations. I: Surface Wetting. *Chaos, Solitons and Fractals*, **9**, 11, 1998, 1875-1890
- [4] *Kokkalis A.G., Panagouli O.K.*: Fractal evaluation of pavement skid resistance variations. II: Surface Wear. *Chaos, Solitons and Fractals*, **9**, 11, 1998, 1891-1899
- [5] *Wasilewska M.*: Analiza właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni drogowych w początkowym okresie ich eksploatacji. *Budownictwo i Architektura*, **13**, 4, 2015, 285-292
- [6] Ogólne Specyfikacje Techniczne, Nawierzchnia z betonu cementowego. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 2014
- [7] *Hall J.W., Smith K.L., Littleton P.*: Texturing of Concrete Pavements. NCHRP Report 634, American Association of State Highway, Transportation Officials, Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA, 2009
- [8] *Szydło A.*: Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria, Wymiarowanie, Realizacja. Polski Cement Sp. z o.o., Kraków, 2004
- [9] *Guada I.M., Rezaei A., Harvey J.T., Spinner D.*: Evaluation of Grind and Groove (Next Generation Concrete Surface). Pilot Projects in California, Report No.: UCPRC-RR-2013-01, 2013 <http://www.ucprc.ucdavis.edu/PDF/UCPRC-RR-2013-01.pdf>
- [10] *Skarabis J., Stockert U.*: Noise emission of concrete pavement surfaces produced by diamond grinding. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, **2**, 2, 2015, 81-92
- [11] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych. Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
- [12] *Haider M., Wehr R., Conter M., Kriegisch M., Gasparoni S.*: Texture and noise characteristics of exposed aggregate concrete road surfaces. 12th International Symposium on Concrete Roads, Praga, 2014
- [13] *Sandberg U.*: Noise characteristics of an exposed aggregate cement concrete surface. 14th International Congress of Sound & Vibration, Cairns, Australia, 2007
- [14] *Sommer H.*: Longtime experience with exposed aggregate surfaces in Austria. Theme 3 - Pavement Performance and Evaluation. 8th International Symposium on Concrete Roads, Lizbona, Portugalia, 1998, 117-121
- [15] *Chandler J.W.E., Phillips S.M., Roe P.G., Viner H.E.*: Quieter concrete roads: construction, texture, skid resistance and noise. TRL Report 576, 2003
- [16] PN-EN 933-3:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 3: Oznaczanie kształtu ziarn za pomocą wskaźnika płaskości
- [17] PN-EN 933-4:2008 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 4: Oznaczanie kształtu ziarn – Wskaźnik kształtu
- [18] *Gardziejczyk W., Gierasimiuk P.*: Influence of texturing method on tyre/road noise of cement concrete pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, **2016**, 1-16

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the employees of Budimex S.A. for their assistance in carrying out the field testing of skid resistance of test pavement sections and sharing with us most valuable information on the practical aspects of application of the EAC pavement.

- [19] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Wodnej z dnia 2 marca 1999 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (z późniejszymi zmianami. Dziennik Ustaw RP z 2016 roku, poz. 124)
- [20] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 16 stycznia 2002 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących autostrad płatnych. Dziennik Ustaw RP z 2002 roku, nr 12, poz. 116
- [21] Gwarancja Jakości. Dokument wzorcowy, 21.07.2015, Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, 2015
- [22] *Wasilewska M., Gardziejczyk W., Gierasimiuk P.*: Evaluation of Skid Resistance Using CTM, DFT and SRT-3 Devices. 6th Transport Research Arena TRA2016, Warszawa, 2016, 3050-3059
- [23] *Wasilewska M., Gardziejczyk W., Gierasimiuk P., Motylewicz M.*: Ocena właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni drogowych przy wykorzystaniu urządzeń TWO, CTM i DFT. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, **33**, 63, nr 1 – t.2, 2016, 375-382
- [24] *Kowalski K.J., Olek J., McDaniel R.S.*: Laboratoryjna ocena właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni asfaltowych. 54. Konferencja naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Białystok-Krynica, 2008, 63-71
- [25] ASTM E2157: Standard Test Method for Measuring Pavement Macro-texture Properties Using the Circular Track Meter. ASTM International, 2015
- [26] ASTM E1911: Standard Test Method for Measuring Paved Surface Frictional Properties Using the Dynamic Friction Tester. ASTM International, 2009
- [27] *Hall J.W., Smith K.L., Titus-Glover L., Wambold J.C., Yager T.J., Rado Z.*: Guide for pavement friction. NCHRP, Contractor's Final Report NCHRP Project 01-43, Transportation Research Board of the National Academies, 2009
- [28] PN-EN 1097-8:2009 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 8: Oznaczanie polerowalności kamienia
- [29] *Gardziejczyk W., Wasilewska M.*: Evaluation of microtexture changes of coarse aggregate during simulated polishing. *Archives of Civil Engineering*, **62**, 2, 2016, 19-34
- [30] ASTM E1960 - 07 Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface. ASTM International, 2015
- [31] *Wambold J.C., Antle C.E., Henry J.J., Rado Z.*: International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements, 1995