

WPŁYW NAWIERZCHNI ULIC NA HAŁAS TOCZENIA POJAZDÓW

WŁADYSŁAW GARDZIEJCZYK¹, JERZY A. EJSMONT²

¹ Politechnika Białostocka, Instytut Inżynierii Budowlanej, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok

² Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk

Keywords: traffic noise, tyre/road noise, road surfaces.

STREET SURFACE INFLUENCE ON VEHICLE NOISE

The wearing courses (top layers) of the streets in towns are usually of asphalt concrete, paving stones or cement concrete blocks type. They must provide good load capacity, high friction, comfortable and quiet ride. The problem of traffic noise reduction by use of proper road surfaces is not very often addressed in Poland. Due to legislation and technical progress during the last decades, a substantial reduction of the power unit noise emitted by cars and trucks has been achieved. It is observed that nowadays even at low speeds typical for urban driving the dominating noise comes from the tyres. The paper compares typical road surfaces that are used in towns from the point of view of their influence on the traffic noise.

Streszczenie

Górne warstwy nawierzchni ulic, nazywane warstwami ścieralnymi, są najczęściej wykonywane z mas mineralno-asfaltowych, kostki kamiennej i w ostatnich latach z betonowej kostki brukowej. Jednym z parametrów charakteryzujących rodzaj pokrycia, poza nośnością, równością i szorstkością, jest jego wpływ na hałas pojazdów. W dotychczasowych rozważaniach w naszym kraju na ten problem praktycznie nie zwracano jednak uwagi. Do niedawna poziom hałasu drogowego, przy niższych prędkościach, zależał głównie od pracy układu napędowego i wydechowego, a w mniejszym stopniu od hałasu toczenia. Postęp techniczny w zakresie budowy pojazdów powoduje jednak, że hałas opon staje się obecnie głównym składnikiem hałasu drogowego, nawet na obszarach zurbanizowanych. W artykule przedstawiono porównanie hałaśliwości nawierzchni bitumicznej z nawierzchniami z kostki kamiennej i z betonowej kostki brukowej.

WSTĘP

Ulice są szczególnym rodzajem dróg samochodowych. Rozwój motoryzacji przyczynił się do istotnych zmian w ich charakterze. Utrudnienia w ruchu, wzrastające niebezpieczeństwa i uciążliwości dla ludności powodują, że

powiązanie ulic z zabudową staje się coraz bardziej niepożądane. Zaleca się izolowanie tras przelotowych od budynków, dzielnic mieszkaniowych, parków i innych obiektów chronionych.

Wymagania stawiane nawierzchniom ulic w miastach różnią się w niektórych szczegółach od wymagań występujących na pozostałych drogach. Wynika to zarówno z innego charakteru ruchu, jak i z przyczyn nie związanych bezpośrednio z głównymi funkcjami dróg. Na ulicach prędkość ruchu jest zwykle niższa niż na drogach poza obszarem zabudowanym. Jednocześnie występują stosunkowo duże wzdłużne obciążenia styczne związane z hamowaniem, ruszaniem i przyspieszaniem pojazdów. W wielu miejscach, zwłaszcza w dzielnicach o zabytkowej architekturze, wymagane jest, aby nawierzchnia ulicy nawiązywała do stylu zabudowy. Nawierzchnie ulic są nazywane „piątą elewacją” wnętrza architektonicznego. Jest to jedna z przyczyn renesansu nawierzchni wykonywanych z kostki kamiennej i betonowej kostki brukowej.

Szczególnego traktowania wymagają górne warstwy nawierzchni, które powinny być odporne zarówno na specyficzne oddziaływania obciążenia skanalizowanego ruchu, jak i na warunki atmosferyczne. Jakkolwiek są one najczęściej wykonywane z mas mineralno-asfaltowych, to na terenach zurbanizowanych można napotkać również kostkę kamienną i betonową kostkę brukową o różnych kształtach i systemach układania.

Nawierzchnie kamienne są najstarszym typem utwardzonych nawierzchni dróg i ulic. Były, oprócz nawierzchni brukowych, typowymi nawierzchniami średniowiecza. Nawierzchnie z kostki kamiennej są nawierzchniami zbliżonymi do brukowcowych (tzw. kocie łby) z tą różnicą, że jako materiał wykorzystuje się obrobione kostki kamienne. Kostki są układane w różne wzory, a do najbardziej znanych należą: układ rzędowy (prosty i ukośny), w jodełkę (zwykłą i wielokrotną) oraz w łuki. Nawierzchnie z betonowych kostek brukowych znajdują w ostatnich latach coraz szersze zastosowanie. Kostki przenoszą obciążenie w trochę inny sposób niż klasyczne nawierzchnie betonowe czy bitumiczne. Układane na podsypce o grubości 20–40 mm pełnią funkcję zarówno warstwy ścieralnej, jak i nośnej. Ważną zaletą tego typu pokrycia ulic jest łatwość naprawy uszkodzonych miejsc przez wymianę zniszczonych kostek oraz łatwy dostęp do instalacji podziemnych.

Podstawowymi cechami techniczno-eksploatacyjnymi nawierzchni są: nośność, równość i szorstkość. Stan techniczny nawierzchni ulic decyduje o komforcie jazdy, lecz w Polsce jest on oceniany przez kierowców w sposób zdecydowanie negatywny. Deformacje w przekroju podłużnym i poprzecznym, koleiny, wyboje i lokalne zapadnięcia powodują w wielu przypadkach utrudnienia w ruchu oraz ujemnie wpływają na bezpieczeństwo jazdy. Innym parametrem oceny nawierzchni ulic, w sytuacji wzrastającego ruchu samochodowego, może być ich wpływ na hałas drogowy. Prowadzone w wielu ośrodkach badania potwierdzają, że na przykład nawierzchnie kostkowe, nawet już przy niskich prędkościach, są zdecydowanie głośniejsze w porównaniu z nawierzchniami bitumicznymi. Stwierdzono także duże różnice w hałaśliwości nawierzchni bi-

tumicznych w zależności od technologii wykonania czy uziarnienia kruszywa. Pewną nowością w zakresie technologii budowy nawierzchni drogowych są dywaniki drenujące, nawierzchnie porowate i poro-elastyczne. Nawierzchnie takie są już stosowane w wielu krajach, mimo wyższych kosztów budowy i pewnych problemów eksploatacyjnych (np. znaczne pogorszenie własności drenazowych w wyniku zamulania po około 3–5 latach). Oprócz dużej redukcji hałasu nawierzchnie te bardzo poprawiają warunki jazdy w czasie deszczu, zapewniając lepszą przyczepność i lepsze warunki widoczności.

Celem niniejszej pracy jest analiza porównawcza poziomów hałasu pojazdów na nawierzchniach ulic wykonanych z mieszanek mastykowo-grysowych (SMA), kostki kamiennej i betonowych kostek brukowych (tzw. polbruk).

ŹRÓDŁA HAŁASU DROGOWEGO

We współczesnych samochodach występują trzy podstawowe źródła hałasu. Pierwszym źródłem jest szeroko rozumiany układ napędowy, zawierający silnik wraz z układem wydechowym i ssącym, oraz układ przeniesienia napędu. Drugim źródłem są współpracujące z nawierzchnią jezdni opony, a trzecim – opływające pojazd powietrze.

Hałas układu napędowego zależy głównie od prędkości obrotowej i w mniejszym stopniu od obciążenia silnika. Ponieważ jednak stosowanie wielobiegowych skrzyń przekładniowych powoduje, że praktyczny zakres prędkości obrotowych silnika jest raczej wąski, to w konsekwencji hałas układu napędowego tylko nieznacznie wzrasta wraz ze wzrostem prędkości. Wzrasta on również przy przyspieszaniu.

Hałas toczenia opon zwany powszechnie hałasem opon jest silnie zależny od prędkości jazdy. Zależność ta jest zbliżona do funkcji logarytmicznej. W konsekwencji przy pewnej prędkości jazdy dochodzi do zrównania hałasu opon i hałasu układu napędowego. Powyżej tej prędkości o hałasie całkowitym pojazdu zaczyna decydować hałas opon. W tabeli 1 przedstawione są typowe wartości prędkości równowagi dla różnych pojazdów. Hałasy aerodynamiczne nie mają dużego wpływu na emisję hałasu na zewnątrz samochodu, ale mogą być głównym źródłem hałasu we wnętrzu pojazdu.

Jak wynika z tabeli 1, najważniejszym źródłem hałasu nowoczesnych pojazdów w płynnym ruchu miejskim są opony, nie zaś – jak często sobie wyobrażamy – układ napędowy. Co ciekawsze, nawet w trakcie badań homologacyjnych prowadzonych według normy ISO 362 (przy pełnym przyspieszeniu) o wyniku badania zaczynają decydować opony, mimo prowadzenia badań na „bardzo cichej” nawierzchni.

Na hałas opon największy wpływ ma charakterystyka nawierzchni oraz parametry techniczne opon. Wbrew jednak powszechnym opiniom, bardzo gładka nawierzchnia nie jest wcale nawierzchnią najcichszą. Jest to wynikiem występującego doszczelniania rowków bieżnika opony, co uaktywnia mechanizmy generowania hałasu związane z drganiem powietrza. Z tego powodu tak

Tabela 1. Prędkość, przy której hałas opon zrównuje się z hałasem układu napędowego
 Cross-over speed for various cases, i.e. the speed above which tyre/road noise is more important than power unit noise

Typ pojazdu Vehicle type	Jazda ze stałą prędkością Cruising	Gwałtowne przyspieszanie Hard accelerating
Samochody osobowe prod. 1985–1995 Cars made 1985–1995	30–35 km/h	45–50 km/h
Samochody osobowe prod. 1996–1999 Cars made 1996–1999	20–30 km/h	40–45 km/h
Samochody ciężarowe prod. 1985–1995 Trucks made 1985–1995	40–50 km/h	50–55 km/h
Samochody ciężarowe prod. 1996–1999 Trucks made 1996–1999	30–35 km/h	45–50 km/h

dobrymi własnościami akustycznymi charakteryzują się nawierzchnie drenażowe, które bardzo skutecznie wentylują rowki bieżnika. Tekstura nawierzchni wpływa również pozytywnie na rozmycie rytmu uderzeń elementów bieżnika o nawierzchnię.

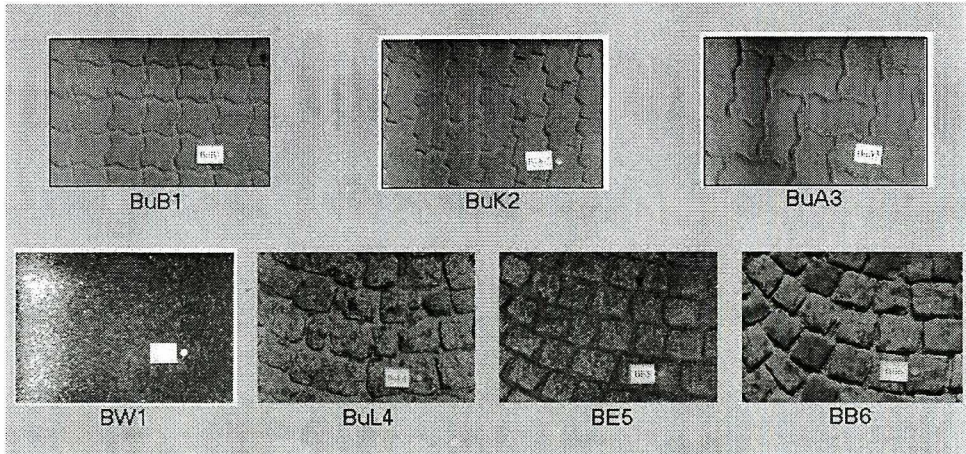
Nawierzchnia ma wpływ na hałas nie tylko bezpośrednio przez zjawiska zachodzące między oponą a jezdnią. Nawierzchnie o dużym poziomie nierówności (jak na przykład nawierzchnie brukowcowe) wywołują hałasy wtórne w pojeździe, związane z drganiami elementów zawieszenia, nadwozia i ładunku. Z kolei nawierzchnie porowate oddziałują korzystnie nie tylko na zmniejszanie hałasu opon, ale redukują również hałas układu napędowego. Jest to związane z ich wpływem na propagację hałasu, gdyż charakteryzują się one wysokim współczynnikiem pochłaniania dźwięku. Oznacza to, że fala dźwiękowa odbijająca się od nawierzchni ulega silnemu osłabieniu.

METODYKA BADAŃ

Badania wpływu nawierzchni ulic na poziom hałasu wykonano dwoma metodami. Pierwsza polegała na pomiarze równoważnych poziomów dźwięku (L_{eq}) w otoczeniu 5 wybranych ulic Białegostoku o nawierzchni bitumicznej i z kostki kamiennej. Oprócz pomiarów hałasu dokonywano jednocześnie pomiarów prędkości samochodów oraz natężenia ruchu i jego struktury rodzajowej. Pomiarzy L_{eq} przeprowadzono w tzw. punktach odniesienia: 1,0 m od krawężnika i 1,2 m nad powierzchnią jezdni, zgodnie z [4].

Badania hałasu toczenia pojazdów wykonywano metodą przyczepową – CPX (*Close Proximity Method*) przy prędkościach: 30, 50, 70 (80) i 110 km/h (w zależności od warunków ruchowo-drogowych), zgodnie z zasadami podanymi w projekcie normy ISO/CD 11819-2 [3]. Pomiarzy były prowadzone na następujących nawierzchniach (przedstawionych na rysunku 1) ulic Białegostoku (poza BE5):

- nawierzchnia bitumiczna: ul. Gen. Kleeberga (BW1);
 - nawierzchnia z kostki kamiennej: ul. Lipowa (BuL4);
 - nawierzchnia z kostki kamiennej: szosa do Bobrownik (BB6);
 - nawierzchnia z kostki kamiennej: ulica przelotowa w Prostkach (BE5)
- (miejscowość położona w woj. warmińsko-mazurskim) w ciągu drogi krajowej Nr 669;
- nawierzchnia z brukowej kostki betonowej: ul. Brzostowskiego (BuB1);
 - nawierzchnia z brukowej kostki kamiennej: ul. Kolbego (BuK2);
 - nawierzchnia z brukowej kostki kamiennej: ul. Armii Ludowej (BuA3).



Rys. 1. Powierzchnie badanych nawierzchni ulic
Tested road surfaces

Aktualny projekt normy określającej warunki pomiaru metodą CPX przewiduje wykorzystanie czterech opon testowych, które zostały uznane za „typowe” dla obecnego okresu. Prawdopodobnie w ostatecznej wersji normy zostanie dopuszczone również stosowanie zestawu dwóch opon testowych, ale zagadnienie to jest nadal przedmiotem dyskusji Grupy Roboczej ISO. Badania przedstawione w niniejszej pracy przeprowadzono dla pełnego zestawu czterech opon, których szczegółowe dane zamieszczone są w tabeli 2.

Na rysunku 2 przedstawione są wzory bieżników tych opon, a na rysunku 3 widoczna jest wykorzystana do badań przyczepa pomiarowa, będąca własnością Politechniki Gdańskiej.

Warstwy ściernalne na badanych nawierzchniach ulic, oprócz technologii ich wykonania i wizualnej oceny stanu technicznego, zostały scharakteryzowane przez określenie tekstury w postaci poziomu nierówności w pasmach o szerokości 1/3 oktawy. W tym celu na sześciu odcinkach badawczych (bez odcinka BuL4) wykonano repliki (odlewy) nawierzchni. W Szwedzkim Instytucie Dróg i Ruchu Drogowego (VTI) w Linköpingu przeprowadzono badania poziomów nierówności przy wykorzystaniu stacjonarnego profilo-

Tabela 2. Dane opon wykorzystywanych w badaniach hałasu metodą CPX
Tyres tested by the CPX method

Symbol opony Tyre symbol	Rozmiar Size	Producent Manufacturer	Bieżnik Tread	Uwagi Comments
A	185/65R15	Vredestain	Protrac	Typowa opona drogowa z kierunkową rzeźbą bieżnika Typical summer tyre with directional tread pattern
B	185/65R15	Avon	CR-322	Typowa opona drogowa Typical summer tyre
C	185/65R15	Avon	CR-65	Opona błotno-śniegowa Winter tyre
D	185R14	Dunlop	Arctic	Opona błotno-śniegowa dobrze odwzorowująca hałas opon od samochodów ciężarowych Winter tyre with aggressive tread pattern replicating truck tyre/road noise



Rys. 2. Zestaw opon wykorzystywanych w badaniach metodą CPX
Tyres used for CPX tests

grafu laserowego. Poziomy nierówności w poszczególnych pasmach obliczone zostały ze wzoru:

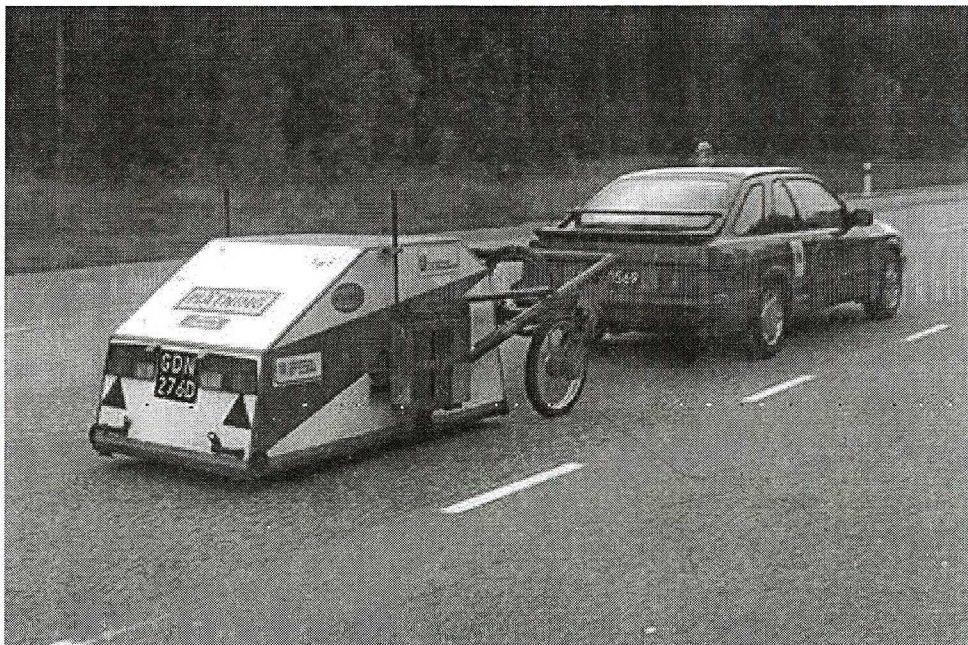
$$L_t = 20 \cdot \log(RMS/T_{ref}),$$

gdzie:

L_t – poziom nierówności [dB],

RMS – pierwiastek ze średniej kwadratowej w zakresie określonych częstotliwości przestrzennych [m],

T_{ref} – poziom odniesienia, $T_{ref} = 10^{-6}$ m,



Rys. 3. Przyczepa do pomiaru hałasu opon i nawierzchni według metody CPX
Test trailer for tyre/road noise measurements by the CPX method

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

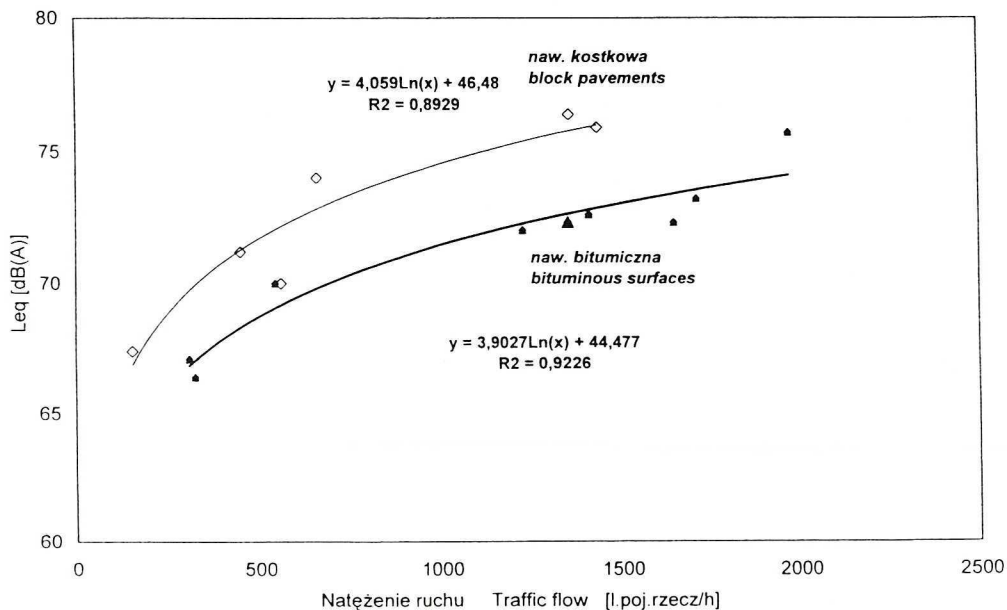
Wyniki pomiarów równowaznego poziomu dźwięku L_{eq} oraz natężenia i struktury rodzajowej ruchu drogowego na badanych odcinkach przedstawione są w tabeli 3. Na rysunku 4 przedstawiona jest zależność między poziomami równowaznymi a natężeniem ruchu.

Jak wynika z danych przedstawionych w tabeli 3 i na rysunku 4, wpływ rodzaju nawierzchni ulic na poziom hałasu jest bardzo wyraźny. W opracowanych w różnych krajach normach i wytycznych wprowadzane są pewne poprawki na etapie prognozowania poziomów dźwięku w otoczeniu tras komunikacyjnych, wynikające z typu nawierzchni [7]. Obowiązujące w naszym kraju poprawki uwzględniające rodzaj nawierzchni wynoszą: 3 dB(A) dla kostki i 5 dB(A) dla pokrycia brukowego w porównaniu z nawierzchniami bitumicznymi i z betonu cementowego [5]. Potwierdzają to uzyskane wyniki poziomów równowaznych, gdyż zaobserwowane różnice między wartościami L_{eq} na nawierzchniach z kostki kamiennej są wyższe o 3–4 dB(A) w stosunku do nawierzchni bitumicznych. Nie przeprowadzono pomiarów L_{eq} w otoczeniu ulic o nawierzchni z brukowej kostki betonowej, z powodu zbyt małego natężenia ruchu, niskiej prędkości oraz udziału w ruchu tylko samochodów osobowych. Nawierzchnie tego typu są dotychczas wykonywane głównie na ulicach osiedlowych i parkingach.

Tabela 3. Wyniki pomiarów ruchu i równoważnych poziomów dźwięku
Traffic description and equivalent sound levels

Nr punktu No.	Nazwa ulicy Street name	Rodzaj nawierzchni Type of the road surface	Natężenie ruchu* Traffic flow [l.poj.rzecz./h]	Udział pojazdów ciężarowych i autobusów Traffic composition (percentage of heavies) [%]	Równoważny poziom dźwięku Equivalent SPL [dB(A)]
I	Legionowa	bitumiczna bituminous	1356	8,3	72,3
			1232	9,0	72,0
			1412	7,9	72,6
II	Antoniukowska	bitumiczna bituminous	1648	9,5	72,3
			1712	10,2	73,2
			1972	11,9	75,7
III	Grochowa	bitumiczna bituminous	308	4,4	67,1
			324	3,1	66,4
			544	4,6	70,0
IV	Lipowa	kostka	1436	7,2	75,9
		kamienna	1360	8,6	76,4
		paving stones	660	9,4	74,0
V	Kalinowskiego	kostka	560	3,3	70,0
		kamienna	450	3,4	71,2
		paving stones	152	4,1	67,4

* Liczba pojazdów rzeczywistych na godzinę.



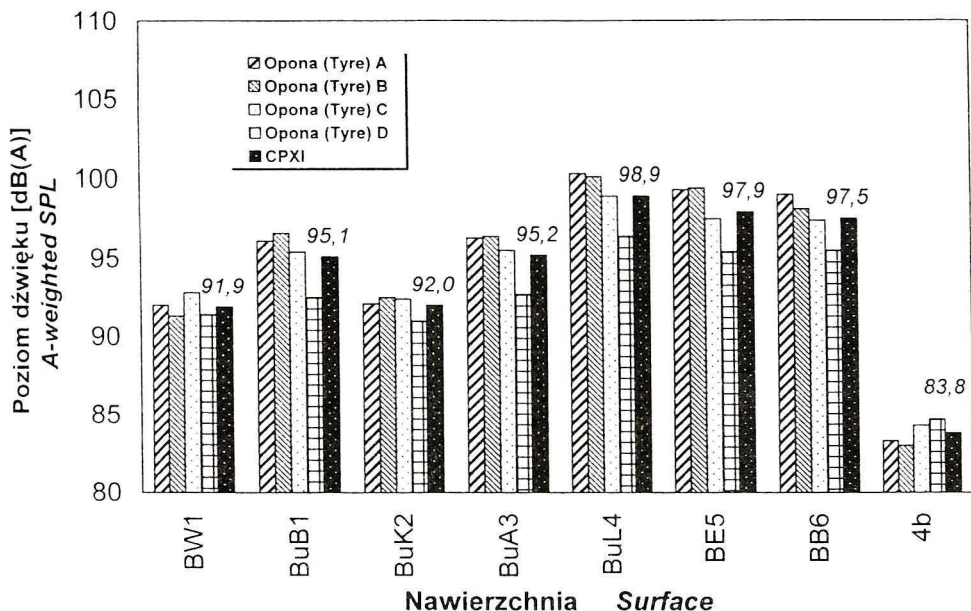
Rys. 4. Równoważne poziomy dźwięku ustalone w otoczeniu wybranych ulic Białegostoku
Equivalent sound levels measured on selected streets in Białystok

Wartości równoważnych poziomów hałasu w otoczeniu ulic są uzależnione od charakterystyki potoków ruchu, a przede wszystkim od struktury rodzajowej i prędkości pojazdów. W pewnych sytuacjach wpływ warunków lokalnych na uzyskiwane równoważne poziomu dźwięku jest trudny do skontrolowania. Tak zdarza się wtedy, gdy charakterystyka strumienia pojazdów zdecydowanie różni się od „typowej”. Przykładowo, jeśli jeden punkt pomiarowy zlokalizowany jest w przekroju, w którym dominuje ruch nowoczesnych pojazdów typu TIR (zwykle ciągniki siodłowe z naczepami), a w innym miejscu dominuje ruch samochodów ciężarowych starszych typów z przewagą wywrotek, to nawet na identycznych nawierzchniach uzyskane wyniki mogą się znacznie różnić. W celu bardziej dokładnego określenia wpływu nawierzchni ulic na hałas wywołany przez opony, należało przeprowadzić badania eliminujące czynniki przypadkowe. Takie kryterium spełniają badania prowadzone metodą CPX.

W tabeli 4 zamieszczono wartości poziomów dźwięku uzyskane w czasie badań nawierzchni metodą CPX. Oprócz indywidualnych wartości dla każdej z opon, dla różnych prędkości podane są również wartości indeksu CPXI. Indeks ten jest uśrednioną wartością poziomów dla wszystkich czterech opon. Przewiduje się, że w przyszłości stosowane będą różne wagi dla poszczególnych opon. Na rysunku 5 przedstawione są poziomy dźwięku i indeksy CPXI uzyskane dla prędkości 50 km/h, przewidywanej jako dopuszczalnej na terenach zurbanizowanych. Ponieważ wśród nawierzchni badanych w Polsce nie znalazły się nowoczesne nawierzchnie drenażowe, autorzy postanowili uwzględnić w analizie wyniki uzyskane w trakcie badań w identycznych warunkach i za pomocą tego samego sprzętu na terenie Holandii i Niemiec w roku 1998. Odcinek o nawierzchni w postaci dwóch warstw z drenażowego betonu asfaltowego został oznaczony w tabeli 4 i na rysunku 5 symbolem 4b.

Na podstawie wartości CPXI, obliczonych dla prędkości 50 km/h, badane nawierzchnie można podzielić na 4 grupy z punktu widzenia generowanego poziomu dźwięku. Do pierwszej należy zaliczyć nawierzchnię bitumiczną (BW1) i z brukowej kostki betonowej (BuK2) o wartości CPXI = 91,9–92,0 dB(A), do drugiej grupy pozostałe 2 odcinki o nawierzchni z brukowej kostki betonowej (BuB1 i BuA3) o wartości CPXI = 95,1–95,2 dB(A), do trzeciej grupy nawierzchnie z kostki kamiennej (BuL4, BE5 i BB6) o wartości CPXI = 97,5–98,9 dB(A). Z pewnością czwartą grupę mogą stanowić nawierzchnie drenażowe nie stosowane dotychczas w naszym kraju. Dla tych nawierzchni uzyskano na terenie Niemiec i Holandii wartości CPXI = 83,8–88,7 dB(A). Różnice w wartościach indeksów CPXI dla prędkości 50 km/h, wynoszące około 3 dB(A) między pierwszą i drugą grupą oraz od 5,6 do 7 dB(A) między pierwszą a trzecią grupą, świadczą o tym, że głównym źródłem nadmiernych poziomów dźwięku jest płaszczyzna kontaktu opony z nawierzchnią.

Interesujący, z punktu widzenia budowy nawierzchni z betonowych kostek brukowych, wydaje się zbliżony poziom hałasu uzyskiwany na nawierzchniach bitumicznych i na nawierzchni z „połbruku” o podłużnym układzie kostek. Fakt ten świadczy o konieczności stosowania optymalnych kształtów i układów pojedynczych bloczków.



Rys. 5. Porównanie poziomów dźwięku dla poszczególnych opon oraz indeksów CPXI na badanych nawierzchniach dla prędkości 50 km/h

Comparison of sound levels and CPX Indexes at 50 km/h

W trakcie badań stwierdzono także pewne systematyczne różnice w poziomach dźwięku generowanego przez różne typy opon. Szczególnie są one wyraźne między wynikami uzyskiwanymi dla opon A, B i C, reprezentujących samochody osobowe, a oponą D odwzorowującą samochody ciężarowe. Na nawierzchni bitumicznej wraz ze wzrostem prędkości następuje wzrost różnicy w poziomach dźwięku generowanego przez oponę D i pozostałe opony. W przypadku opon A, B i C przy wzroście prędkości z 50 do 110 km/h zanotowano wzrost poziomu dźwięku o około 11 dB(A), dla opony D zaś – 15,3 dB(A). Na nawierzchniach z betonowych kostek brukowych opona D generuje niższe poziomy hałasu przy wszystkich prędkościach w stosunku do pozostałych opon. Na przykład na odcinku BuB1 (z „polbruku”) przy wzroście prędkości z 30 do 70 km/h nastąpił wzrost poziomu hałasu o około 16 dB(A) dla opon A, B i C oraz wzrost o 14,4 dB(A) dla opony D. Na nawierzchniach z kostki kamiennej wzrost prędkości powodował podobny wzrost poziomu dźwięku w przypadku wszystkich typów opon.

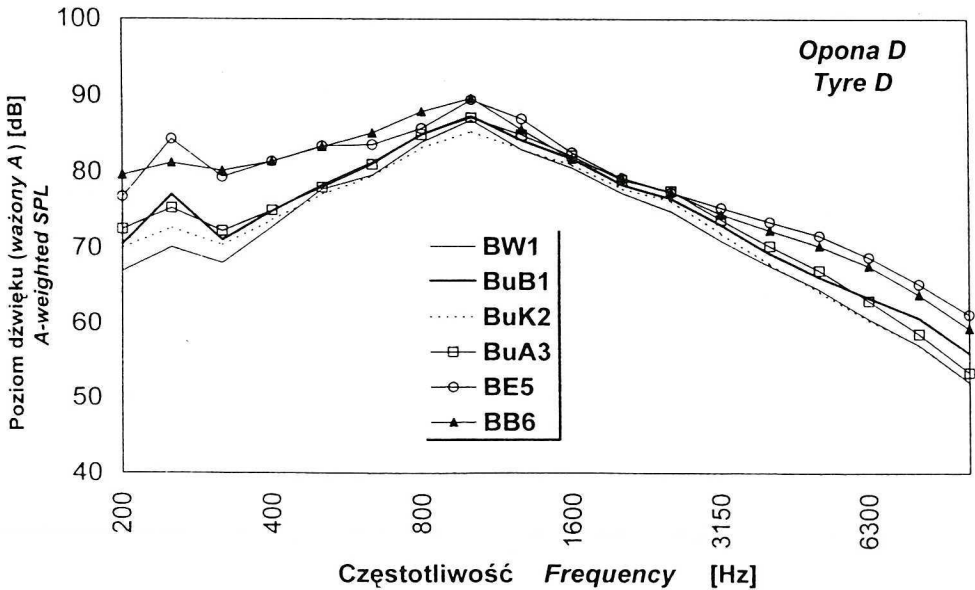
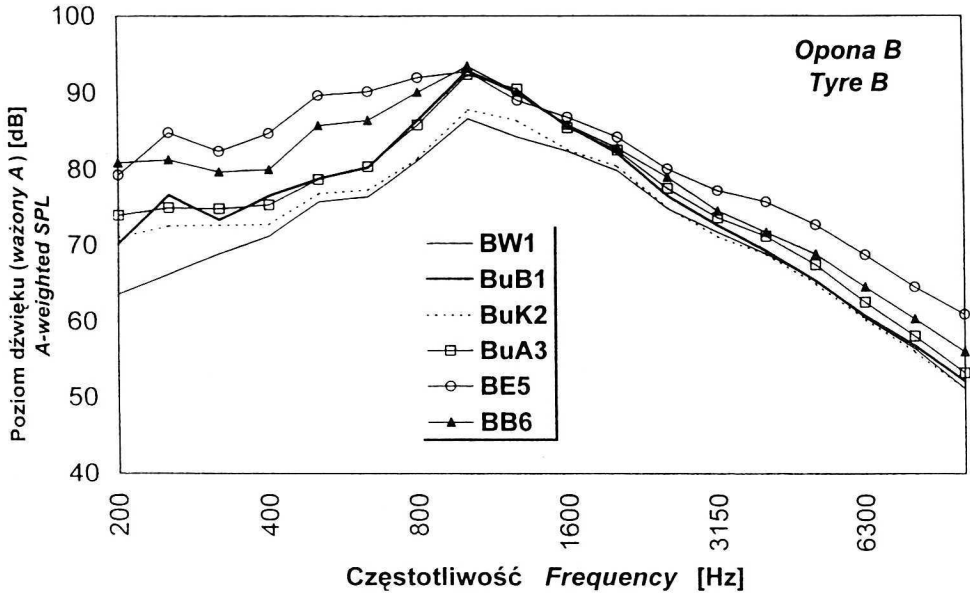
Na rysunku 6 przedstawiono wyniki analiz widmowych w pasmach o szerokości 1/3 oktawy dla opon B i D. Należy zwrócić uwagę na fakt, że różnice w widmach dźwięku dotyczą głównie zakresu niskich częstotliwości i są one zdecydowanie większe w przypadku opony B. Zbliżone wartości poziomów dźwięku w przypadku opony D na wszystkich nawierzchniach świadczą o mniejszym wpływie rodzaju pokrycia na poziom hałasu toczenia pojazdów ciężarowych.

Tabela 4. Wyniki pomiarów hałasu metodą CPX
Results of CPX measurements

Symbol odcinka Designation	V [km/h]	Rodzaj nawierzchni Surface type	Poziom dźwięku dla opony SPL for tyre [dB(A)]				Indeks CPXI [dB(A)]
			A	B	C	D	
BW1	50	mieszanka	92,0	91,3	92,8	91,4	91,9
	80	mastykowa	99,3	99,0	99,3	99,8	99,3
	110	grysowa SMA	103,5	103,0	103,1	106,7	104,1
BuB1	30	brukowa	87,0	86,6	85,7	84,3	85,9
	50	kostka betonowa	96,1	96,6	95,4	92,5	95,1
	70	concrete blocks	103,3	102,4	102,3	98,7	101,7
BuK2	30	j.w.	82,9	82,8	83,5	82,2	82,9
	50	as above	92,1	92,5	92,4	91,0	92,0
BuA3	30	j.w.	86,3	86,5	86,1	84,1	85,8
	50	as above	96,3	96,4	95,5	92,7	95,2
BuL4	30	kostka	92,1	91,6	89,1	87,4	90,1
	50	kamienna	100,3	100,1	98,9	96,4	98,9
	70	paving stones	106,1	105,8	104,6	102,1	104,7
BE5	30	j.w.	90,2	90,0	87,6	86,7	88,6
	50	as above	99,3	99,4	97,5	95,4	97,9
	80	as above	106,6	106,6	106,8	104,5	106,1
BB6	30	j.w.	89,4	88,7	88,0	86,4	88,1
	50	as above	99,0	98,1	97,4	95,5	97,5
	80	as above	107,0	106,8	106,4	104,1	106,1
4b	50	dwuwarstwowy	83,3	83,0	84,3	84,7	83,8
	80	drenażowy beton	89,3	88,2	89,7	91,9	89,8
	110	asfaltowy double layer drainage pavement	93,2	92,9	93,3	96,8	94,1

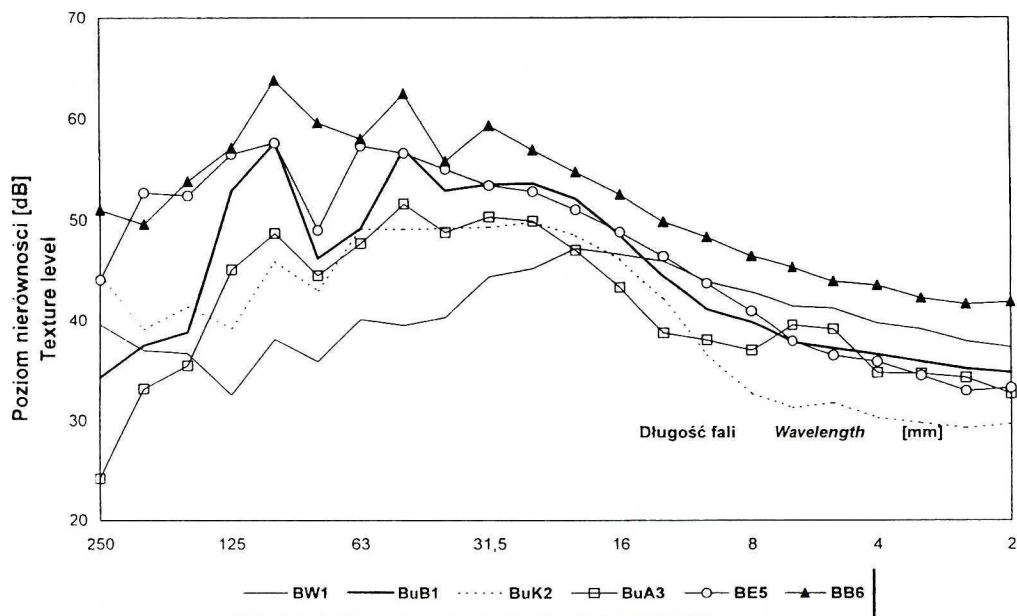
Na rysunku 7 przedstawiono charakterystyki widmowe nierówności w pasmach o szerokości 1/3 oktawy, uzyskane dla nawierzchni na badanych odcinkach za pomocą stacjonarnego profilografu laserowego. Na nawierzchniach kostkowych wyraźnie widoczne są maksima odpowiadające „podziałce” stosowanego układu kostki. Należy zauważyć także pewne zróżnicowanie w poziomach nierówności nawierzchni z betonowych kostek brukowych, a w szczególności pomiędzy odcinkiem BuB1 i BuK2.

Określone poziomy nierówności i widma dźwięku w poszczególnych pasmach częstotliwości pozwoliły na obliczenie współczynników korelacji między poziomami nierówności w zakresie długości fal od 2 do 250 mm i poziomami



Rys. 6. Porównanie widm dźwięku korygowanych filtrem A, uzyskanych przy prędkości 50 km/h na różnych nawierzchniach dla opon B i D

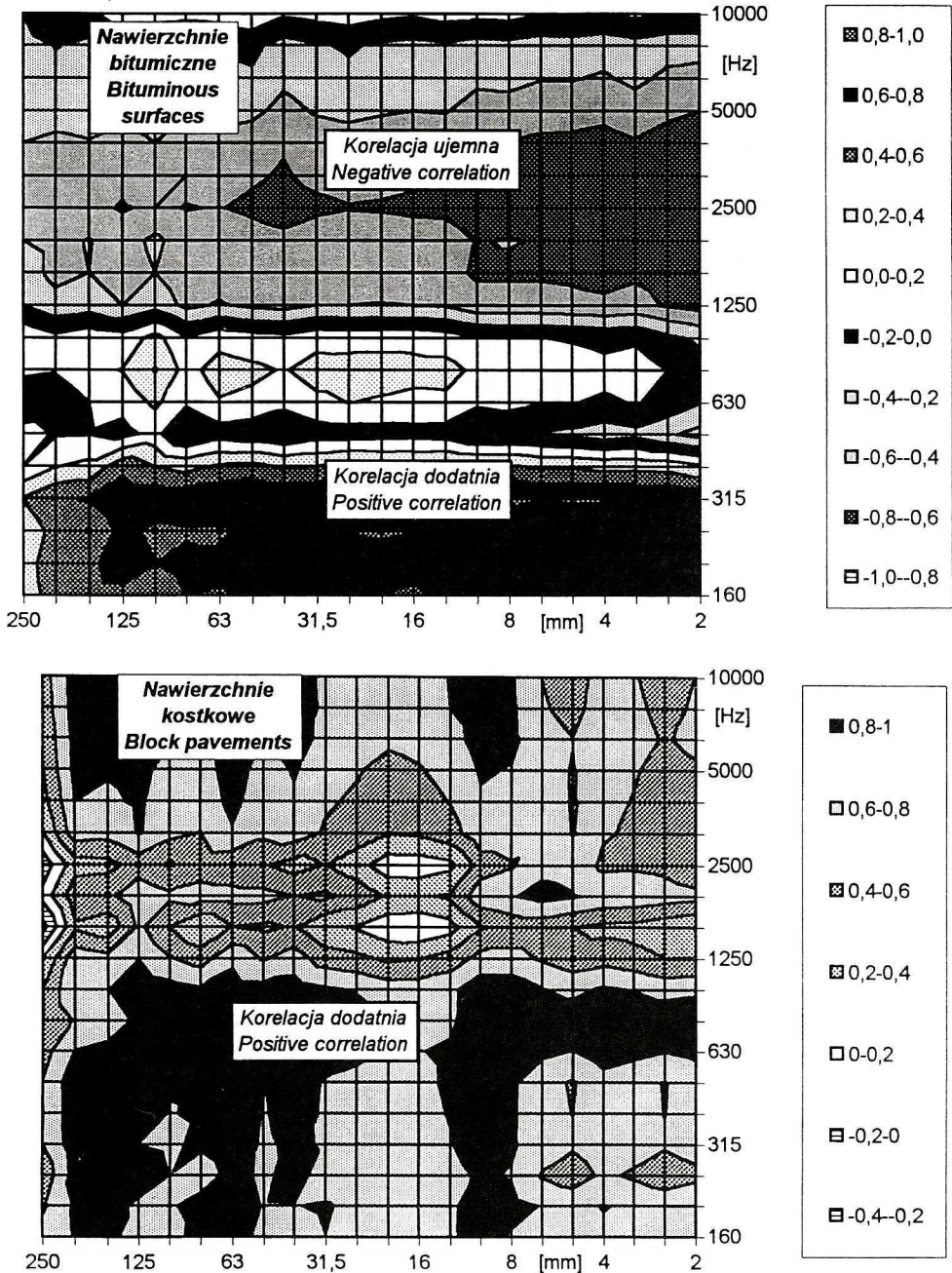
Comparison of A-weighted sound levels obtained on different road surfaces at 50 km/h for tyres B and D



Rys. 7. Charakterystyki widmowe nierówności nawierzchni na odcinkach badawczych (w stosunku do poziomu 10^{-6} m)

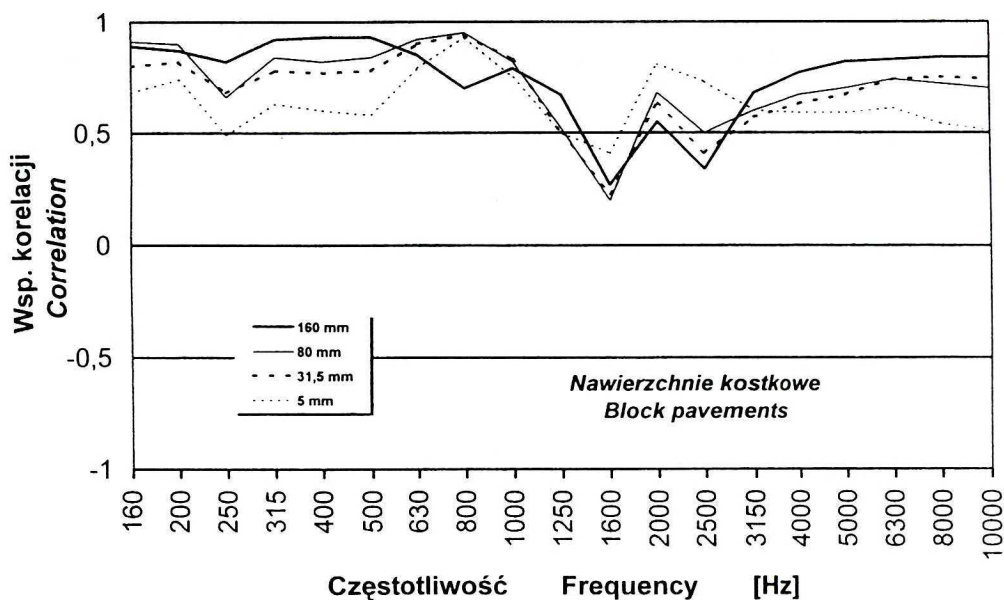
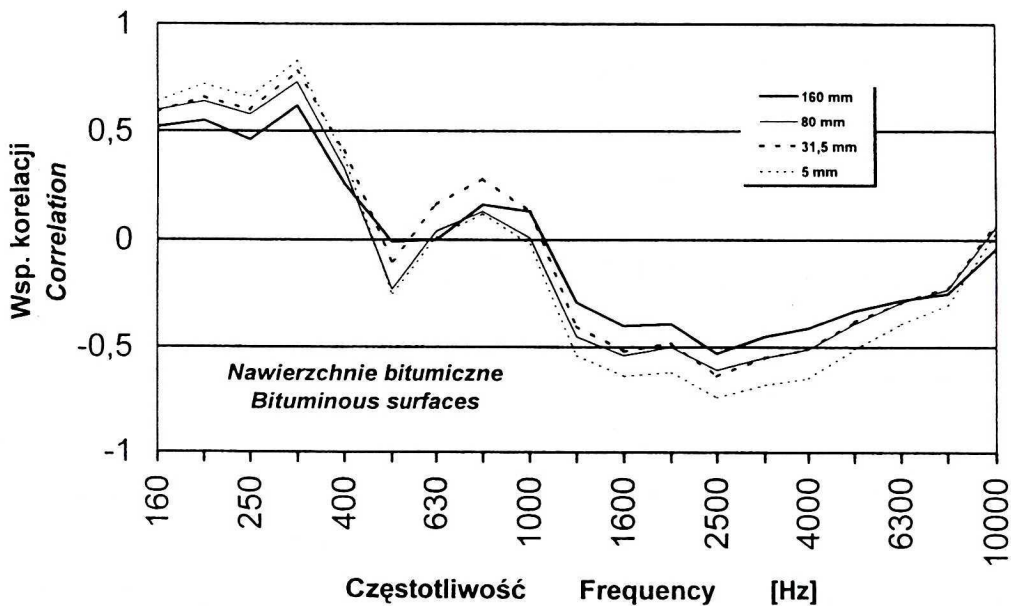
Texture spectra of test surfaces (re. 10^{-6} m)

dźwięku w zakresie częstotliwości od 160 do 10 000 Hz. Na rysunku 8 przedstawiono obliczone wartości współczynników korelacji dla opony wzorcowej D dla prędkości 50 km/h. Korelacja obliczona została oddzielnie dla wyników uzyskanych na nawierzchniach z kostki kamiennej i „polbruku” oraz na nawierzchniach bitumicznych (oprócz nawierzchni BW1 uwzględniono również inne badane nawierzchnie bitumiczne). Należy zwrócić uwagę na dodatnie wartości współczynników korelacji na nawierzchniach kostkowych. Oznacza to, że ewentualne obniżenie poziomu generowanych dźwięków w całym zakresie częstotliwości wymaga obniżenia poziomu nierówności. Jest to równoznaczne z koniecznością poprawy stanu technicznego powierzchni tego typu pokrycia oraz udoskonalenia połączeń poszczególnych kostek między sobą. W przypadku nawierzchni bitumicznych sytuacja jest nieco inna. Stwierdzono ujemną korelację wymienionych charakterystyk powyżej częstotliwości 1000 Hz. Oznacza to, że obniżenie poziomu dźwięku w zakresie częstotliwości wyższych od 1000 Hz wymaga zwiększenia poziomu nierówności (inaczej mówiąc głębokości tekstury), a w zakresie częstotliwości niższych od 1000 Hz – zmniejszenia poziomu nierówności. Na rysunku 9 przedstawiono wartości współczynników korelacji w pasmach 1/3-oktawowych (tercjowych) między poziomami dźwięku i poziomami nierówności dla długości fal: 160, 80, 31,5 i 5 mm, dla opony testowej D przy prędkości 50 km/h. Współczynniki korelacji mają zbliżone wartości dla długości fal odpowiadających zarówno megateksturze (160 i 80 mm), jak i makroteksturze (31,5 i 5 mm).



Rys. 8. Współczynniki korelacji między poziomami nierówności dla poszczególnych długości fal tekstury nawierzchni (oś X) oraz poziomami hałasu dla 1/3-oktawowych zakresów częstotliwości (oś Y). Opona D, prędkość 50 km/h. Rysunek górny – dla nawierzchni kostkowych, rysunek dolny – dla nawierzchni bitumicznych

Correlation coefficients between texture levels (X) and sound levels (Y) for tyre D and speed 50 km/h. Upper figure for block pavements and lower figure for bituminous surfaces



Rys. 9. Wartości współczynników korelacji między poziomami dźwięku w pasmach 1/3-oktawowych i poziomami nierówności dla długości fal 160, 80, 31,5 i 5 mm dla opony D przy prędkości 50 km/h

Correlation coefficients between texture levels and sound levels for selected wavelengths: 160, 80, 31,5 and 5 mm. Speed 50 km/h, tyre D

Wyniki w zakresie korelacji tekstury i poziomów dźwięku uzyskane przez autorów pracy dla nawierzchni bitumicznych są zbliżone do wyników uzyskanych przez Sandberga i Descorneta [8]. Przeprowadzili oni badania na zdecydowanie większej liczbie odcinków, a przede wszystkim przy większym zróżnicowaniu technologii wykonania nawierzchni. Wyniki uzyskane przez autorów na nawierzchniach kostkowych są zbliżone w pewnym stopniu do wyników uzyskanych przez Legaya dla nawierzchni drenujących [6]. Może to świadczyć o braku zjawiska sprężania powietrza zarówno na nawierzchniach drenazowych, jak i na nawierzchniach kostkowych.

WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań równoważnego poziomu dźwięku w otoczeniu ulic potwierdziły istotny wpływ rodzaju nawierzchni na poziom hałasu drogowego. W przypadku nawierzchni z kostki kamiennej wartości L_{eq} , przy zbliżonych innych charakterystykach warunków ruchu, są wyższe o 3–4 dB(A) w stosunku do nawierzchni bitumicznych. Tekstura nawierzchni ulic jest jednym z podstawowych czynników wpływających na ich „hałaśliwość”. W przypadku nawierzchni kostkowych wskazane jest obniżenie poziomu nierówności przez poprawę stanu technicznego powierzchni oraz stosowanie optymalnych kształtów i układów kostek. Poziom hałasu na nawierzchniach bitumicznych, w zakresie częstotliwości niższych od 1000 Hz, może być obniżony przez zmniejszenie głębokości tekstury, w zakresie częstotliwości wyższych od 1000 Hz – przez zwiększenie poziomu nierówności w zakresie makro- i megatekstury.

Stwierdzono, że poziomy hałasów pochodzących od samochodów ciężarowych nie zależą w tak dużym stopniu od rodzaju tekstury, jak w przypadku samochodów osobowych.

Z porównania poziomów dźwięków generowanych na badanych odcinkach i na nawierzchniach dróg niemieckich i holenderskich wynika, że bez wątpienia klasyczne nawierzchnie drogowe nie dorównują nowoczesnym nawierzchniom porowatym. Nawierzchnie porowate umożliwiają zmniejszenie hałasu opon o około 7–9 dB w stosunku do typowych dywaników z mieszanek grysowo-mastyksowych (SMA). Jakkolwiek są one droższe od nawierzchni klasycznych i wymagają okresowego czyszczenia, to w wielu przypadkach stanowią alternatywę nawet dla ekranów akustycznych.

Jako ciekawostkę można dodać, że jedne z pierwszych na świecie profesjonalnych badań hałasu pojazdów w miastach wykonane były w latach 1934–1936 przez zespół profesora Gądzikiewicza z Uniwersytetu Jagiellońskiego [1, 2]. Stwierdzono w nich między innymi, że dla wozów konnych z obręczami kół wykonanymi ze stali różnice w hałasie między nawierzchniami asfaltowymi a „kocimi łbami” dochodzą do 25 fonów (w przybliżeniu 25 dB). W tamtym okresie postulowano więc wprowadzenie nawierzchni asfaltowych na miejsce bruków. Obecnie jednak klasyczne nawierzchnie asfaltowe nie spełniają już w wystarczającym stopniu wymagań związanych z rosnącym ruchem

drogowym. Można więc oczekiwać, że powoli ich miejsce zajmą nawierzchnie nowocześniejsze, bardziej „ciche”. W przyszłym roku prawdopodobnie zostanie rozpoczęty duży program badawczy, sponsorowany przez agencje Unii Europejskiej, mający na celu opracowanie technologii budowy i utrzymania takich nawierzchni.

Badania i analizy przedstawione w artykule zostały wykonane w ramach projektu badawczego KBN T07E 029 15.

LITERATURA

- [1] Gans H.: *Hałas, jego wpływ na zdrowie i niektóre sposoby badania stosowane w higienie*, Medycyna, **18**, 618–621, (1934), **5**, 153–156 (1935).
- [2] Gądzikiewicz W.: *Badanie hałasu ulicznego w miastach polskich*, Zdrowie Publiczne, **7**, 619–624 (1936).
- [3] ISO/CD 11819-2. *Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise – part 2: „The Close – Proximity method”*.
- [4] Kucharski R.J., K. Kaczmarski, M. Kraszewski, A. Kurpiewski, S. Zych: *Metody pomiarów hałasu zewnętrznego w środowisku*, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa 1992.
- [5] Kucharski R.J., M. Kraszewski, A. Kurpiewski: *Obliczeniowe metody oceny klimatu akustycznego w środowisku*, Wyd. Geologiczne, Warszawa 1988.
- [6] Legay V.: *Macrotexture and Low Frequency Tyre/Road Noise Corellation*, Reprint from the Conference Proceedings of the International Tire/Road Noise Conference 1990 „INTROC 90”, Gothenburg, Sweden 1990, s. 15–19.
- [7] Sandberg U.: *Low Noise Road Surfaces. A State-of-the-Art, Review*, Proceedings of the Eurosymposium: “The Mitigation of Traffic Noise in Urban Areas”, Nantes, France 1992, s. 139–184.
- [8] Sandberg U., G. Descornet: *Road Surface Influence on Tire/Road Noise (Part I & II)*, Proceedings of the International Conference on Control Engineering “INTER-NOISE 80”, Miami, Florida, USA 1980, **56**, s. 1–16.

Wpłynęło 13 marca 2000, zaakceptowano do druku: 14 czerwca 2000.