



BARTŁOMIEJ GRZESIK

Politechnika Śląska
bartomiej.grzesik@polsl.pl
ORCID: 0000-0003-2586-887X



PIOTR SOLYGA

Colas Polska Sp. z o.o.
piotr.solyga@colas.pl



MARCIN WOJTYSIAK

Prezes Zarządu LBT Sp. z o.o.
marcin.wojtysiak@grupa-lbt.pl

Wybrane aspekty oceny równości nawierzchni mostowych przy użyciu metod nieniszczących

Standardem procedury odbiorowej nawierzchni mostowych dróg krajowych jest weryfikacja grubości warstwy, wskaźnika zagęszczenia warstw i zawartości wolnych przestrzeni w warstwach, spadków poprzecznych, równości podłużnej i poprzecznej, właściwości przeciwpoślizgowych oraz pozostałych (szerokości, rzędnych wysokościowych, złączy). W omawianych w artykule przypadkach na etapie odbioru zakwestionowana została równość podłużna. Rozpowszechnioną obecnie i jednocześnie obowiązującą dla tych klas dróg krajowych metodą oceny tego parametru jako kinematycznego oddziaływania profilu podłużnego na jadący model pojazdu samochodowego jest wskaźnik IRI (*International Roughness Index*) [8], [9], [10], [11], [[12] szeroko opisywany m.in. na łamach miesięcznika „Drogownictwo”.

W trakcie badań odbiorowych wykonywanych krótko po uło-

żeniu warstwy ścieralnej z SMA stwierdzono przekroczenia w zakresie przyjętych na kontraktach, dopuszczalnych wartości wskaźnika równości IRI na obiektach mostowych (wyznaczonych z krokiem pomiarowym co 50 m). Dla tej klasy dróg warunki kontraktowe przewidują naliczanie potrąceń w przypadku przekroczenia wartości średnich lub maksymalnych w pewnych tolerancjach. Przekroczenie tolerancji skutkuje wprowadzeniem programu naprawczego. W związku z tym wdrożono przewidziane w takiej sytuacji procedury, włącznie z wprowadzeniem programu naprawczego w co najmniej jednym przypadku, w celu przywrócenia wymaganego poziomu tego parametru. Program naprawczy przewiduje w takiej sytuacji frezowanie (będące równocześnie profilowaniem warstwy ochronnej) i ponowne wykonanie warstwy ścieralnej. We wszystkich analizowanych przypadkach odrębni wykonawcy odpowiadali za wykonanie warstwy ochronnej z MA i ścieralnej z SMA, co zrodziło naturalną dyskusję na temat źródła nierówności i odpowiedzialności za zaistniałą sytuację.

Przedmiot badań

Charakterystyka obiektów mostowych

Pomiary przeprowadzono na nawierzchniach czterech nowo wybudowanych w latach 2017–2021 obiektów mostowych leżących w ciągach dwóch dróg klasy S (KR6). Podstawowe informacje o obiektach zestawiono w tabeli 1, widok obiektów w trakcie realizacji na fotografiach 1 ÷ 4.



Fot. 1. Obiekt nr 1. Źródło: GDDKiA



Fot. 2. Obiekt nr 2. Źródło: GDDKiA



Fot. 3. Obiekt nr 3. Źródło: GDDKiA



Fot. 4. Obiekt nr 4. Źródło: GDDKiA

Tabela 1. Charakterystyka ogólna obiektów mostowych

Rodzaj obiektu	Długość [m]	Liczba jezdni × liczba pasów ruchu × szerokości [m]
Estakada	573	2 × 2 × 3,5 + 1 × 2,5 (pas awaryjny)
Most + estakada	1024	2 × 4 × 3,5
Most	105	2 × 4 × 3,5
Wiadukt	72	2 × 4 × 3,5

Charakterystyka nawierzchni mostowych

Przyjęty w obu projektach układ warstw z uwagi na zastosowane rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych (asfalt lany i mieszanka grysowo-mastyksowa SMA) odpowiada współczesnym standardom w zakresie nawierzchni mostowych [1], [2], [3], [4], [5], [6]. Oba rodzaje mieszanek są powszechnie znane i używane w drogownictwie – w artykule pominięto dokładniejszą ich charakterystykę, jako kwestię wykraczającą poza podjętą problematykę. W kontekście grubości nawierzchni przyjęty układ dwóch warstw o gru-

bości każdej około 4 cm przy mieszankach o uziarnieniu do 11 mm, również uznać należy za rozwiązanie tradycyjne. Stosowanie grubszych nawierzchni jest niekorzystne z punktu widzenia projektanta dążącego do zmniejszenia ciężaru własnego konstrukcji mostu [2]. Zastosowanie asfaltu lanego w warstwie ochronnej zapewnia pożądaną elastyczność i szczelność nawierzchni mostowej [1]. Należy jednak podkreślić, że grubość, zwłaszcza w przypadku warstwy ochronnej z asfaltu lanego, ma znaczenie. Nadmierna grubość warstwy asfaltu lanego w stosunku do uziarnienia mieszanki zwiększa jej podatność na deformacje lepkoplastyczne. Jedynym odniesieniem w zakresie zalecanych

Tabela 2. Zalecane grubości warstw nawierzchni mostowej z mieszanek o uziarnieniu 11 mm

Warstwa	Typ mieszanki, wymiar, przeznaczenie	Projektowana grubość warstwy technologicznej [cm]
Ścieralna	SMA 11 S	3,5 ÷ 5,0
Ochronna	MA 11 W	3,5 ÷ 4,0



Fot. 5. Układanie MA na obiekcie nr 4. Źródło: GDDKiA



Fot. 6. Układanie SMA na obiekcie nr 2. Źródło: GDDKiA

grubości warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych w przypadku zastosowania MA i SMA o uziarnieniu do 11 mm są wartości zamieszczone w nieaktualnych obecnie wymaganiach technicznych WT-2 Nawierzchnie asfaltowe 2008 [7].

Układanie asfaltu lanego w jednej warstwie na grubość większą niż 6 cm jest uznawane za naruszenie zasad wiedzy technicznej. W przypadku układania grubszych warstw z asfaltu lanego (zwłaszcza MA 16) należy układać je zawsze dwuetapowo, maksymalnie do 6 cm w jednej warstwie [2]. Zabieg ten pozwoli na uzyskanie prawidłowej równości powierzchni pod kolejną warstwę technologiczną. Ta kwestia jest kluczowa w dalszej części rozważań.

Zgodnie z projektem przedmiotowe nawierzchnie cechowała grubość warstw zgodna z tabelą 3.

Tabela 3. Grubość warstw nawierzchni na badanych obiektach mostowych

Warstwa	Grubość warstw [cm] na obiektach			
	nr 1	nr 2	nr 3	nr 4
Ścieralna z SMA 11	4,0	4,0	4,0	4,0
Ochronna z MA 11	4,5	6,0	6,0	6,0

Przykładowe fotografie z obszernej dokumentacji prac podczas realizacji inwestycji, w tym w zakresie nawierzchni mostowych, przedstawiono poniżej (fot. 5–6).

Metodyka pomiarów

Wskaźnik nierówności IRI

Opis metody oraz procedura obliczania międzynarodowego wskaźnika nierówności IRI znajduje się w normie PN-EN 13036-5:2020-01 „Cechy powierzchniowe nawierzchni drogowych i lotniskowych – Metody badań – Część 5: Określanie wskaźników nierówności podłużnej.” [13] Wartość IRI standardowo należy wyznaczać z krokiem co 50 m. Długość ocenianego odcinka nawierzchni nie powinna być większa niż 1000 m. Odcinek końcowy o długości mniejszej niż 500 m należy oceniać łącznie z odcinkiem poprzedzającym. Do oceny równości odcinka nawierzchni ustala się minimalną liczbę wskaźników IRI równą 5. W przypadku odbioru robót na krótkich odcinkach nawierzchni, których całkowita długość jest mniejsza niż 250 m, dopuszcza się wyznaczanie wskaźników IRI z krokiem mniejszym niż 50 m, przy czym należy ustalać maksymalną możliwą długość kroku pomiarowego, z uwzględnieniem minimalnej wymaganej liczby wskaźników IRI równej 5. Wymagana równość podłużna jest określona przez dopuszczalną wartość średnią wyników pomiaru IRI_{sr} , oraz dopuszczalną wartość maksymalną pojedynczego pomiaru IRI_{max} , których nie można przekroczyć na długości ocenianego odcinka nawierzchni. Pomiaru równości dokonano profilografem laserowym Dynatest RSP-3.

W związku z faktem, że procedura, jako dobrze znana, nie wymaga szerszego wyjaśniania, autorzy skoncentrowali się na obowiązujących w zakresie tego parametru wartościach dopuszczalnych, których przekroczenie stało się przyczynkiem poruszenia niniejszej problematyki. Po uchynieniu w roku 2022 rozporządzenia Ministra Transportu i Go-

spodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, za aktualne należy przyjąć wymagania zawarte w wytycznych określania wybranych cech powierzchniowych nawierzchni jezdni WR-D-64 [15] (tab. 4).

Tabela 4. Wartości dopuszczalne przy odbiorze nawierzchni metodą profilometryczną [15]

Klasa drogi	Element nawierzchni	Dopuszczalne odbiorcze wartości wskaźników dla zadanego zakresu długości odcinka drogi [mm/m]	
		IRI_{sr}^*	IRI_{max}
A, S, GP	Pasy: ruchu, awaryjne, dodatkowe, włączania i wyłączania, jezdnie łącznic	1,3	2,4
	Jezdnie łącznic, jezdnie MOP, utwardzone pobocza	1,5	2,7

*) w przypadku odbioru odcinków warstwy nawierzchni o całkowitej długości mniejszej niż 500 m lub odbioru robót polegających na ułożeniu na istniejącej nawierzchni jedynie warstwy ścieralnej (niezależnie od długości odcinka robót) dopuszczalną wartość IRI_{sr} według tabeli należy zwiększyć o 0,2 mm/m.

Powyższe wartości będą stanowić odniesienie dla uzyskanych wyników pomiarów przedstawionych w dalszej części artykułu.

Grubość warstw

Tradycyjna metoda określania grubości wykonanej warstwy nawierzchni drogowej wg normy PN-EN 12697-36 [14] polega na odwiercaniu rdzeni, na których dokonuje się pomiaru. Wadą metody jest niewielki obszar, do którego można odnieść wynik pomiaru oraz jej niszczący charakter. Zwłaszcza ta ostatnia cecha, z uwagi na ryzyko uszkodzenia hydroizolacji, wyklucza odwierty jako metodę weryfikacji grubości nawierzchni mostowych. Wspomniana norma [14] opisuje metodę alternatywną, nieniszczącą, polegającą na pomiarze elektromagnetycznym. Pomiaru dokonuje się przy pomocy aparatu elektromagnetycznego (zasada prądów wirowych) oraz przeciwbieguna (reflektora), najczęściej w postaci metalowego dysku umiejscowionego w konstrukcji nawierzchni przed ułożeniem warstwy, której grubość ma zostać określona. Konieczne jest uprzednie ustalenie dokładnej lokalizacji reflektora, w celu dokonania pomiaru. Odczyt ma wciąż jednak charakter punktowy. Z uwagi na dość kłopotliwą procedurę poprzedzającą sam pomiar, metoda nigdy nie zyskała popularności.

Poniżej opisana metoda georadarowa należy do grupy metod radiofalowych, co oznacza, że w istocie również stanowi metodę pomiaru elektromagnetycznego. Metoda jest całkowicie nieinwazyjna i charakteryzuje się dużą szybkością wykonywania pomiaru, co z kolei skutkuje jej wysoką wydajnością. Aparatura pomiarowa składa się m.in. z dwóch anten: nadawczej i odbiorczej. Antena nadawcza emituje w głąb ośrodka (asfaltowego, betonowego, gruntowego, skalnego itd.) falę elektromagnetyczną, która ulega odbiciu, załamaniu i tłumieniu. Najważniejszym zjawiskiem, z punktu widzenia metody georadarowej, jest odbicie fali na granicy dwóch ośrodków różniących się względną przeni-

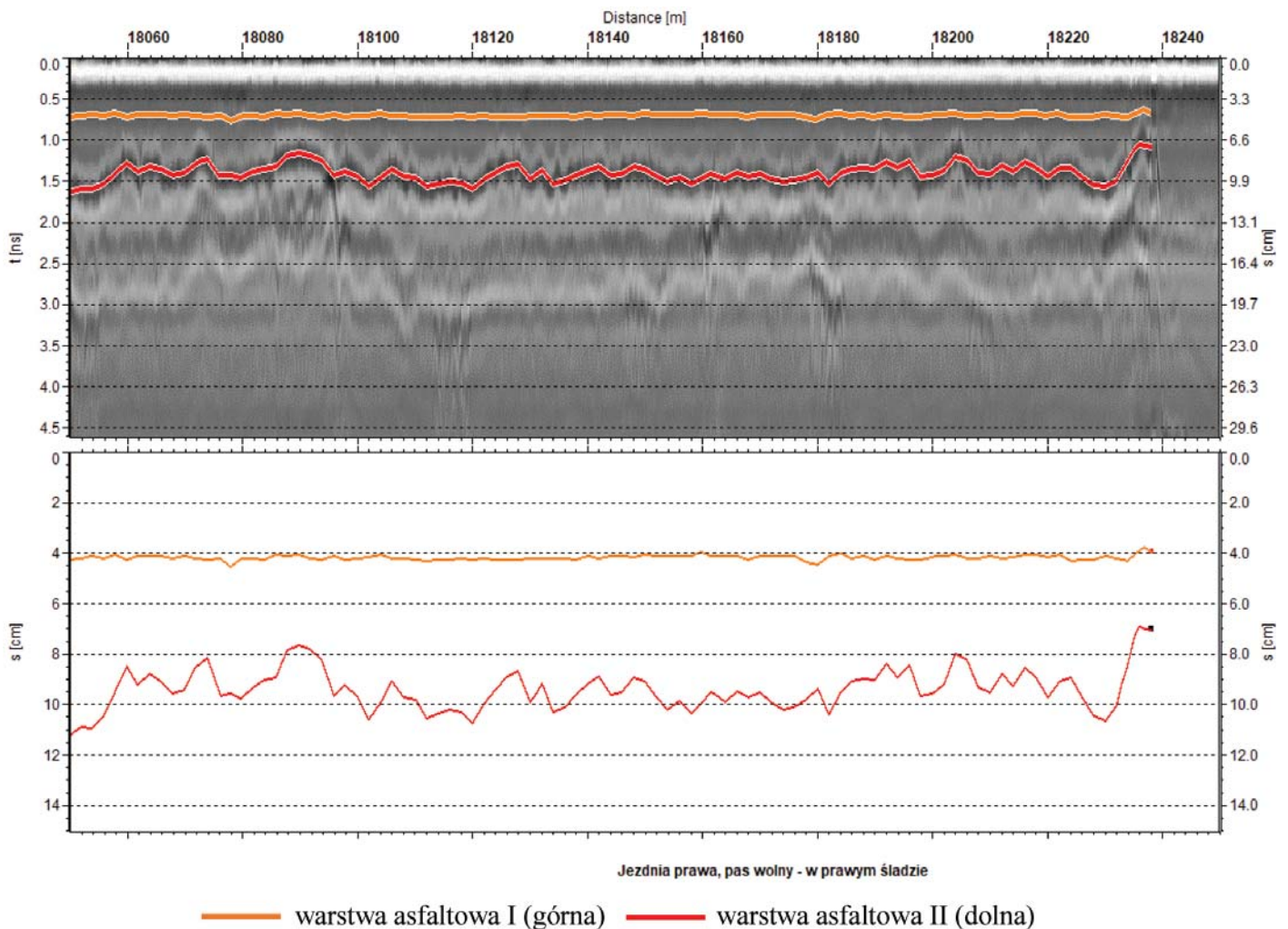
Fot. 7. Zestaw anten zamontowanych na samochodzie (M. Wojtyśiak)



kalnością elektryczną ϵ_r . Im większy kontrast przenikalności elektrycznej, tym większa amplituda fali odbitej. Cały zestaw montowany jest na samochodzie (fot. 7).

Fala odbita rejestrowana jest przez antenę odbiorczą. Echogram powstaje poprzez przejazd anten wzdłuż wytyczonego profilu (tzw. profilowanie refleksyjne). Otrzymany

obraz falowy jest odzwierciedleniem budowy ośrodka. Głębokość penetracji zależy przede wszystkim od częstotliwości pracy anteny nadawczej, jak również od współczynnika tłumienia fal elektromagnetycznych, który rośnie wraz ze wzrostem przewodności ośrodka. Na przewodność ma wpływ wilgotność ośrodka, porowatość, zawartość minera-



Rys. 1. Przykładowy wynik pomiaru na odcinku pasa nr 2 jezdni prawej na obiekcie nr 1

tów przewodzących i inne. Ośrodki o najmniejszym współczynniku tłumienia fali elektromagnetycznej (o najmniejszej przewodności) to przede wszystkim: suche piaski, żwiry, zwięzłe skały, suchy beton, asfalt. Ośrodki silnie tłumiące falę elektromagnetyczną to np. gliny, ily, muły, lessy, woda.

Z punktu widzenia metody georadarowej, najważniejszym czynnikiem wpływającym na współczynnik tłumienia ośrodka materialnego będzie częstotliwość fali elektromagnetycznej propagującej w tym ośrodku. Im wyższa częstotliwość fali emitowanej w głąb ośrodka, tym mniejsza głębokość penetracji, ale za to większa rozdzielczość pomiaru.

Badania georadarowe wykonano z użyciem aparatury RIS HI-PAVE włoskiej firmy IDS i anten o wysokiej rozdzielczości (typu horn) i częstotliwości równej 2 [GHz], zamontowanych na samochodzie pomiarowym, które dają zasięg głębokościowy do ok. 0,5 m. Pomiaru wykonano w systemie automatycznego wyzwalania sygnału przy użyciu koła pomiarowego z krokiem pomiarowym około 9 skanów / metr, oknem czasowym 12 [ns] i częstotliwością próbkowania sygnału 512 [MHz].

Czynności wykonane w processingu (w kolejności wykonywania):

1. Korekta Amplitudy poziomu zera.
2. Obliczanie oraz usuwanie szumów tła.
3. Wzmocnienie sygnału (automatyczne wzmocnienie sygnału).
4. Filtrowanie dolnoprzepustowe i górnoprzepustowe.
5. Matematyczne funkcje dające stałe wzmocnienie sygnału w podanym interwale próbki (mnożenie).

Wynik pomiaru prezentowany jest w postaci tabelarycznej i profilu podłużnego (rys. 1).

Georadar pozwala określić grubości warstw asfaltowych (pakietu warstw asfaltowych) z dokładnością około $\pm 1 \div 3$ mm, a zatem błąd pomiaru może być podobny jak przy mierzeniu rdzeni. W przypadku wyników uzyskanych z pomiarów na obiekcie nr 1, niezależnie wykonany pomiar geodezyjny na sieci punktów rozmieszczonych w trzech ciągach pomiarowych i w przekrojach co 5 m na poziomie warstwy ochronnej i na poziomie warstwy ścieralnej potwierdził dokładność pomiaru georadarowego grubości tej ostatniej z błędem nieprzekraczającym 1 mm.

Pomiar równości wykonano w śladzie prawego koła pojazdu. Pomiaru georadarowe z uwagi na montaż anteny w osi samochodu oraz wykonywanie pomiarów pod ruchem drogowym wykonano w miarę możliwości w śladzie prawego koła lub zbliżając się do osi pasa ruchu.

Wyniki pomiarów wskaźnika równości IRI

Pomiaru równości dokonano na odcinkach obejmujących nawierzchnie mostowe na obiektach. W przypadku obiektu nr 1 były to wszystkie pasy ruchu jezdni prawej (dwa pasy oraz pas awaryjny) w przypadku obiektów nr 2, 3, 4 wybrane pasy ruchu obu jezdni. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 5.

Czerwonym kolorem zaznaczono wartości przekroczone względem dopuszczalnych wartości IRI_{sr} i IRI_{max} przedstawionych w tabeli 4. W przypadku obiektu nr 1 stwierdzono przekroczenia IRI_{sr} na pasie zewnętrznym (prawym) i awaryjnym jezdni prawej. W przypadku obiektu nr 2 stwierdzono przekroczenie wartości dopuszczalnych IRI_{max} na trzech z czterech pasów jezdni prawej oraz na wszystkich pasach jezdni lewej, natomiast wartość IRI_{sr} przekroczona została na trzech pasach ruchu wyłącznie jezdni lewej. W przypadku obiektu nr 3 stwierdzono przekroczenia dopuszczalnych wartości IRI_{max} na obu jezdniach (trzech pasach jezdni prawej i dwóch pasach jezdni lewej) oraz przekroczenia IRI_{sr} jedynie na pasie lewym jezdni prawej. Na obiekcie nr 4 pomiar wykazał równoczesne przekroczenia wartości dopuszczalnych IRI_{max} i IRI_{sr} na dwóch z czterech pasów jezdni prawej i dwóch z czterech pasów jezdni lewej (na pasie nr 1 tej jezdni stwierdzono jedynie przekroczenie wartości dopuszczalnych IRI_{max}).

Wykreślone pola w tabeli 5 oznaczają brak pasa ruchu w przekroju poprzecznym, natomiast znak „-” pasy, na których nie przeprowadzono pomiaru IRI.

Niebieską ramką zaznaczono wyniki pomiarów IRI dla pasów ruchu, na których podjęto decyzję o wykonaniu georadarowego pomiaru grubości warstw nawierzchni na całej długości poszczególnych obiektów mostowych.

Wyniki pomiarów grubości warstw metodą georadarową

Przyjęto odcinki pomiarowe o długości 574 m dla obiektu nr 1; 1155 m dla obiektu nr 2; 80 m dla obiektu nr 3 oraz 50 m dla obiektu nr 4. Pojedynczy odczyt jest uśrednioną wartością z pomiaru na długości około 2 m (18 odczytów – 9 skanów/metr). Średnią grubość warstwy ścieralnej i warstwy ochronnej na obiekcie nr 1 wyznaczono na podstawie 287 odczytów na pas ruchu, na obiekcie nr 3 na podstawie 40 odczytów na pas ruchu, na obiekcie nr 4 na podstawie

Tabela 5. Wyniki pomiarów wskaźnika równości IRI

Obiekt	Jezdnia prawa								Jezdnia lewa								Wymagania	
	Pas 1		Pas 2		Pas 3		Pas 4 lub awaryjny		Pas 1		Pas 2		Pas 3		Pas 4 lub awaryjny			
	IRI_{sr}	IRI_{max}	IRI_{sr}	IRI_{max}	IRI_{sr}	IRI_{max}	IRI_{sr}	IRI_{max}	IRI_{sr}	IRI_{max}	IRI_{sr}	IRI_{max}	IRI_{sr}	IRI_{max}	IRI_{sr}	IRI_{max}	IRI_{sr}	IRI_{max}
Nr 1	1,2	2,09	1,8	2,38			1,6	2,03	-	-	-	-			-	-		
Nr 2	1,3	3,81	1,2	2,82	1,2	2,29	0,9	3,53	1,3	3,30	1,5	3,17	1,7	4,71	1,2	3,42	1,3	2,4
Nr 3	1,4	3,41	1,3	2,16	1,3	2,37	-	-	1,2	2,42	1,3	1,95	1,3	2,61	-	-		
Nr 4	1,2	2,20	1,3	2,04	1,5	2,65	1,5	2,45	1,3	2,88	1,4	3,74	1,4	4,79	-	-		

25 odczytów na pas ruchu. Na obiekcie nr 2 liczba odczytów była różna dla każdego pasa. Na pasie nr 2 jezdni prawej wykonano 802 odczyty, dla pasa nr 3 jezdni prawej 856 odczytów, dla pasa nr 2 jezdni lewej 704 odczyty, a dla pasa nr 3 jezdni lewej 623 odczyty.

Wyniki pomiarów grubości warstw na kolejnych obiektach mostowych przedstawiono w tabelach 6÷9.

Wykonane pomiary (tab. 6÷9) pozwoliły stwierdzić, że w przypadku każdego obiektu mostowego średnia grubość warstwy ścieralnej z SMA jest zgodna z projektem (4,0 cm przy zachowaniu tolerancji $\pm 10\%$ grubości). Liczba pomia-

rów pozwoliła na wprowadzenie do analizy statystycznej odchylenia standardowego. Grubość warstwy ścieralnej w kilku przypadkach pojedynczych odczytów przekroczyła górną tolerancję grubości, osiągając wartości powyżej 44 mm (maksymalnie 49 mm na pasie nr 2 jezdni lewej obiektu nr 2, natomiast nie stwierdzono przekroczenia dolnej granicy tolerancji w pojedynczych pomiarach (wartości mniejszej niż 36 mm). Co istotne, odchylenie standardowe grubości warstwy ścieralnej wyniosło zaledwie 1,0 mm na obiekcie nr 1 i 2,0 mm na obiektach nr 2, 3, 4.

W przypadku wszystkich badanych nawierzchni, warstwę

ochronną z MA cechuje znaczne zróżnicowanie grubości. W przypadku obiektu nr 1, grubość warstwy waha się w zakresie 22 mm do 104 mm, aczkolwiek uśredniona jej wartość wynosząca w zależności od pasa ruchu od 50 mm do 53 mm

Tabela 6. Średnie grubości warstw nawierzchni na obiekcie nr 1

Cecha warstwy	Jezdnia prawa					
	Pas 1		Pas 2		Pas awaryjny	
	w. ścieralna	w. ochronna	w. ścieralna	w. ochronna	w. ścieralna	w. ochronna
Grubość średnia [cm]	4,0	5,3	4,1	5,1	4,1	5,0
Odchylenie standardowe σ [cm]	0,1	1,3	0,1	1,0	0,1	1,2
Grubość max. [cm]	4,4	10,4	4,5	10,0	4,5	10,4
Grubość min. [cm]	3,7	2,2	3,9	2,9	3,7	2,8

Tabela 7. Średnie grubości warstw nawierzchni na obiekcie nr 2

Cecha warstwy	Jezdnia prawa				Jezdnia lewa			
	Pas 2		Pas 3		Pas 2		Pas 3	
	w. ścieralna	w. ochronna	w. ścieralna	w. ochronna	w. ścieralna	w. ochronna	w. ścieralna	w. ochronna
Grubość średnia [cm]	4,1	6,1	4,1	6,1	4,2	5,8	4,1	6,4
Odchylenie standardowe σ [cm]	0,1	1,1	0,1	1,2	0,2	1,4	0,1	1,2
Grubość max. [cm]	4,8	10,0	4,6	10,5	4,9	9,7	4,8	10,2
Grubość min. [cm]	3,6	1,7	3,6	2,8	3,6	1,5	3,7	3,5

Tabela 8. Średnie grubości warstw nawierzchni na obiekcie nr 3

Cecha warstwy	Jezdnia prawa		Jezdnia lewa	
	Pas 1		Pas 3	
	w. ścieralna	w. ochronna	w. ścieralna	w. ochronna
Grubość średnia [cm]	4,2	5,2	4,3	5,1
Odchylenie standardowe σ [cm]	0,2	0,5	0,2	0,6
Grubość max. [cm]	4,6	6,1	4,5	6,2
Grubość min. [cm]	3,8	4,0	3,9	3,2

nieznacznie przekracza górną granicę tolerancji. Istotne jest natomiast odchylenie standardowe grubości, przekraczające 10 mm, co istotnie narusza obowiązujące standardy i zasady wiedzy technicznej w zakresie kształtowania nawierzchni drogowych.

Bardzo podobnie prezentuje się sytuacja w kwestii grubości warstwy ochronnej na obiekcie nr 2. Uśredniona grubość na poszczególnych pasach ruchu jezdni lewej wynosząca 58 mm i 64 mm odpowiada gru-

Tabela 9. Średnie grubości warstw nawierzchni na obiekcie nr 4

Cecha warstwy	Jezdnia prawa				Jezdnia lewa			
	Pas 3		Pas 1		Pas 2		Pas 3	
	w. ścieralna	w. ochronna	w. ścieralna	w. ochronna	w. ścieralna	w. ochronna	w. ścieralna	w. ochronna
Grubość średnia [cm]	4,1	5,6	4,1	6,7	4,2	6,8	4,2	6,5
Odchylenie standardowe σ [cm]	0,2	0,9	0,2	0,7	0,2	0,8	0,2	0,6
Grubość max. [cm]	4,6	7,6	4,3	8,1	4,4	8,4	4,5	7,6
Grubość min. [cm]	3,6	4,1	3,7	5,5	3,8	5,2	3,8	5,1

bości projektowanej (60 mm) z uwzględnieniem tolerancji, ale już skrajne odczyty i odchylenie standardowe odpowiednio 12 mm i 14 mm świadczą o niedopuszczalnych waha- niach jej grubości. Nieznacznie lepiej prezentuje się sytuacja na jezdni prawej, gdzie uśredniona grubość na poszczegól- nych pasach ruchu jezdni prawej wynosi 61 mm, choć skrajne odczyty i odchylenie standardowe odpowiednio 11 mm i 12 mm stanowią o niedopuszczalnych waha- niach jej grubości.

Z kolei na obiekcie nr 3 maksymalne zmierzone grubości bliskie są wartości projektowanej (60 mm), ale uśrednione wartości 52 mm i 51 mm świadczą o zaniżeniu grubości tej warstwy ze szkodą dla trwałości całej nawierzchni mostowej. Odchylenia standardowe pomiarów grubości na poziomie 5 mm i 6 mm dla poszczególnych pasów, mimo że mniejsze niż na obiektach nr 1 i 2 nadal stanowią nieakceptowany poziom dla warstwy z MA.

Warstwę ochronną z MA na obiekcie nr 4 cechuje najniższy poziom błędów wykonawczych (średnia grubość od 56 mm do 68 mm przy odchyleniu standardowym 6 mm do 9 mm) spośród pozostałych, jednak stałość jej grubości wciąż dale- ka jest od obowiązujących w tym zakresie standardów.

Wnioski

Zestawienie wyników pomiarów wskaźników równości IRI z wynikami pomiarów georadarowych pozwala spojrzeć na problem nierówności nawierzchni szerzej niż tylko z perspek- tywy jakości wykonania wieńczącej konstrukcję nawierzchni warstwy ścieralnej. W przeanalizowanych przypadkach wyka- zano niedopuszczalne wahania grubości warstwy ochronnej, na której w każdym wypadku ułożono poprawnej grubości warstwę ścieralną. Opisane w punkcie 5 niewielkie, z rezer- wą mieszczące się w obowiązujących tolerancjach, wahania grubości warstwy ścieralnej w żaden sposób nie tłumaczą ujawnionych podczas badania równości często znaczących przekroczeń w zakresie wskaźnika IRI. Zatem utrzymanie stałej grubości warstwy ścieralnej (metoda układania „na grubość”) na niewystarczająco równej warstwie ochronnej (wiążącej) będzie manifestowało się pogorszeniem wskaźni- ków równości IRI_{sr} , IRI_{max} . W analizie uzyskanych z pomiarów georadarowych profili podłużnych nie sposób pozostawić bez komentarza kwestii równości betonowej płyty pomosto- wej, ponieważ, jak można zauważyć na Rys. 1, jej powierzch- nia może mieć związek ze zróżnicowaną grubością warstwy ochronnej (której w istocie nadano nieprzewidzianą funkcję warstwy wyrównawczej). Z uwagi na restrykcyjne standardy wykonywania obiektu mostowego, należy wykluczyć lokalne nierówności płyty, ponieważ uniemożliwiłyby one prawidłową aplikację hydroizolacji. Interpretacja profili z uwagi na ich skażoną skalę nie pozwala jednak wykluczyć zaistnienia roz- bieżności między projektowanymi a rzeczywistymi rzędnymi płyty pomostowej, które na odcinkach długości setek metrów ukształtują się w na tyle łagodne nierówności, że pozwolą na prawidłowe wykonanie hydroizolacji, ale nie pozwolą na wykonanie warstwy ochronnej o stałej grubości.

W aspekcie wykonawczym pakietu składającego z się warstwy ochronnej z MA i ścieralnej z SMA należy zwrócić

uwagę na jeszcze jedną istotną kwestię. Stwierdzone na obiektach znaczące wahania grubości warstwy z asfaltu lane- go (1,5 ÷ 10 cm) spowodują lokalne zróżnicowanie warunków układania, a zwłaszcza zagęszczania SMA, które manifesto- wać się mogą m.in. wystąpieniem nierówności nawierzchni. Inaczej kształtować się będą pod wpływem kontaktu z gorą- cą mieszanką SMA warunki termiczne w wystudzonej war- stwie ochronnej z MA o grubości 1,5 cm, a inaczej w warstwie o grubości 10 cm, może bowiem lokalnie dochodzić do jej uplastycznienia na całej wysokości lub w jej części.

Podjęcie ewentualnej decyzji o ponownym wykonaniu warstwy ścieralnej w przypadkach jak opisane powyżej pozwoli przywrócić wymagany poziom równości podłuż- nej, a zatem bezpieczeństwa użytkowników, jednak pomija kwestię niejednorodności konstrukcji nawierzchni w zakre- sie grubości, jako istotnego czynnika decydującego o jej trwałości zmęczeniowej.

Udoskonalana w Polsce od przeszło dekady metodyka pomiarów georadarowych z uwagi na szybkość, bezinwa- zyjność i stale rosnącą dokładność staje się atrakcyjną al- ternatywą dla tradycyjnych metod pomiarowych, a przyjęcie jej do kanonu standardowych czynności odbiorowych na- wierzchni wydaje się już tylko kwestią czasu.

Bibliografia

- [1] Błazejowski K.: *SMA. Teoria i praktyka*. Rettenmaier Polska sp. z o.o., Warszawa, 2007.
- [2] Radziszewski P. (red.): *Rozwiązania materiałowo-technologiczne izolacji i nawierzchni obiektów mostowych*. Raport końcowy. Po- litechnika Warszawska, 2013.
- [3] Sarnowski M., Radziszewski P., Piłat J., Kowalski K., Król J.: *Oce- na trwałości mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do izolacji i nawierzchni obiektów mostowych*. Budownictwo i Archi- tektura, 13(4), 2014.
- [4] Radziszewski P., Piłat J., Sarnowski M., Król J., Kowalski K.: *Na- wierzchnie asfaltowe na obiektach mostowych*. Oficyna Wydaw- nicza Politechniki Warszawskiej, 2016.
- [5] Wąchalcki K.: *Nowoczesne nawierzchnie na mostach. Asfalt lany*. Inżynier Budownictwa, 2, 2018.
- [6] Wójcik-Wiśniewska M., Ostrowski P., Merska O., Budziński B.: *Na- wierzchnie na obiektach mostowych*. Drogi Publiczne, 2, 2021.
- [7] Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych. WT-2 Na- wierzchnie asfaltowe 2008. GDDKiA, Warszawa 2008.
- [8] Szpinek S.: *Nadzór merytoryczny nad pomiarami równości po- dłużnej i głębokości koleiny – badania porównawcze urządzeń pomiarowych*. Zbiór corocznych raportów dla GDDKiA, Warsza- wa, 1995–2013.
- [9] Szpinek S.: *Ocena równości podłużnej nawierzchni dróg krajo- wych pomiarami jedno- i wielotorowymi*. Drogownictwo, 1/2000.
- [10] Szpinek S.: *(Nie)równość miarą (zu)życia nawierzchni jezdni dro- gi*. Drogownictwo, 6/2000.
- [11] Szpinek S.: *Ocena równości nawierzchni wskaźnikami IRI*. Dro- gownictwo, 10/2000.
- [12] Godlewski D., Szpinek S.: *Równość nierówności drogi, czyli co warto (po)wiedzieć o IRI*. Drogownictwo, 5/2016.
- [13] PN-EN 13036-5:2020-01 Cechy powierzchniowe nawierzchni dro- gowych i lotniskowych – Metody badań – Część 5: Określanie wskaźników nierówności podłużnej.
- [14] PN-EN 12697-36: 2022-09 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Meto- dy badań. Część 36: Określanie grubości nawierzchni asfaltowej.
- [15] Wytyczne określania wybranych cech powierzchniowych na- wierzchni jezdni. Wzorce i standardy rekomendowane przez Ministra właściwego ds. transportu. WR-D-64. Ministerstwo In- frastruktury, Departament Dróg Publicznych, Warszawa 2022.