INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW Zakład Diagnostyki Nawierzchni

SPRAWOZDANIE

z realizacji pracy pt.: "Analiza możliwości wykorzystania techniki radarowej w ocenie stanu połączeń międzywarstwowych".

SPRAWOZDNIE CZĘŚCIOWE Etap III – zadania 6-8

Zleceniodawca: Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad

Umowa nr 2176/2008 z dnia 06.08.2008 roku

Opracowali: mgr inż. Jacek SUDYKA – IBDiM dr inż. Lech KRYSIŃSKI – Uniwersytet Warszawski Kierownik Zakładu Diagnostyki Nawierzchni

mgr inż. Tomasz MECHOWSKI

Warszawa, czerwiec 2010

Spis treści

1	Ocena możliwości przyjętej techniki diagnostycznej przez analizę danych	
	uzyskanych w warunkach terenowych	5
1.1	Końcowa kalibracja systemu	.5
1.2	Wyniki badań z drugiej serii pomiarowej	.6
2	Ocena zastosowanej techniki diagnostycznej pod kątem jakości uzyskiwanych	
	wyników i ich znaczenia w ocenie trwałości istniejących konstrukcji 1	.5
2.1	Matematyczny model sygnału refleksyjnego1	5ا
2.2	Analiza porównawcza danych uzyskanych przy pomocy opracowanego modelu	
	matematycznego i standardowych procedur filtrowania sygnału	L 8
2.3	Ocena znaczenia uzyskiwanych wyników w ocenie trwałości istniejących konstrukcji 2	22
3	Podsumowanie 2	24
Bibliografia27		27
ZAŁĄ	28 AAACZNIK	

Spis ilustracji

Rysunek 1.1 Odcinek A_P, echogram górny - pomiar w 2009 roku, echogram dolny – pomiar w 2010 roku. Oznaczenia: A – horyzont reprezentujący granicę między warstwą ścieralną a wiążącą, sekcje 1,5,6 i 7 - skropienie w różnych ilościach, sekcje 2,3 i 4 - brak sczepności osiągnięty przez zastosowanie odpowiednio: brak skropienia, zaczynu pylastego oraz zaczynu gliniastego. Linią przerywaną oznaczono odcinki gdzie wg. przyjętej metody interpretacji występuje brak sczepności pomiędzy warstwami.7

Rysunek 1.3 Odcinek B_P. Fragment echogramu (przetworzonego standardową procedurą "background removal") uzyskanego z pomiarów na odcinku o jednorodnej charakterystyce (refleks podwójny rejestrowany w tej samej odległości od powierzchni, na całym odcinku) wraz z lokalizacją odwiertu, obrazem oscyloskopowym pomiaru radarowego w miejscu odwiertu (okno czasowe 3,5ns) oraz zdjęciem rdzenia a (zdjęcie przeskalowane). Na całym odcinku widoczna para refleksów, odpowiadająca utracie połączenia warstw wiążących w miejscu wbudowanej siatki przeciwspękaniowej............9

Rysunek 1.4 P Fragment echogramu uzyskanego z pomiarów wraz z lokalizacją odwiertu, obrazem oscyloskopowym pomiaru radarowego w miejscu odwiertu (okno czasowe 3,5ns) oraz zdjęciem rdzenia (zdjęcie przeskalowane)......10

Rysunek 1.6 Rdzeń b – brak połączenia w warstwie wiążącej, kruszywo na powierzchniach połączenia całkowicie odsłonięte (brak spoiwa).....12

Rysunek 1.7 Fragment echogramu (przetworzonego standardową procedurą "background removal") uzyskanego z pomiarów na odcinku o zmiennej charakterystyce (przebieg refleksów nie jest równoległy do powierzchni na całym odcinku) wraz z lokalizacją odwiertów, obrazem oscyloskopowym pomiaru radarowego w miejscach odwiertów (okno czasowe 3,5ns) oraz zdjęciami rdzeni a i b (zdjęcia przeskalowane). Żółte markery na echogramie oznaczają miejsca zmiany konstrukcji nawierzchni.13

Rysunek 1.10 P Fragment echogramu (przetworzonego standardową procedurą "background removal") uzyskanego z pomiarów na odcinku o zmiennej charakterystyce wraz z lokalizacją odwiertu, obrazem oscyloskopowym pomiaru radarowego w miejscu odwiertu (okno czasowe 3,5ns) oraz zdjęciem rdzenia a (zdjęcie przeskalowane). Na echogramie widoczne są zmiany amplitudy i znaku refleksów odpowiadających połączeniu warstwy ścieralnej i wiążącej (odcinki o długości 7-10 m oznaczone jako A) oraz braku połączenia górnej warstwy wiążącej z dolną (odcinek oznaczono jako B).....15

Rysunek 2.5 Symulacja stanu nawierzchni obciążonej osią 115 kN: rysunek a) - odkształcenia, rysunek b) - naprężenia nawierzchni pod kołem pojazdu przy pełnej sczepności międzywarstwowej i przy jej braku......23

Rysunek 2.5 Symulacja trwałości zmęczeniowej nawierzchni w zależności od sczepności (na podstawie opracowania (Judycki J, 2003)).23

1 Ocena możliwości przyjętej techniki diagnostycznej przez analizę danych uzyskanych w warunkach terenowych

Najlepszą metodą oceny faktycznych możliwości i przydatności opracowanej metodyki pomiarowo-interpretacyjnej jest jej sprawdzenie w warunkach rzeczywistych. Dlatego w ramach niniejszego zadania wykonano dodatkową serię pomiarową na wytypowanych wcześniej odcinkach. Pomiary wykonano zgodnie z ustawieniami systemu pomiarowego i metodyką pomiaru opisaną w punkcie 1.1. Wyniki badań (echogramy zamieszczono w Załączniku) oraz ich analiza została przedstawiona w punkcie 1.2.

1.1 Końcowa kalibracja systemu

Przeprowadzone w poprzednich etapach pracy badania laboratoryjne i terenowe oraz ich analiza pozwoliły na wypracowanie ostatecznej formuły dotyczącej metodyki pomiaru. W porównaniu do poprzedniej propozycji ustawień, przygotowanej w ramach drugiego etapu pracy, zmieniono częstotliwość próbkowania z 100kHz na 300kHz, a także zwiększono szerokość okna próbkowania sygnału z 7ns do 10ns. Zmiany te pozwalają zwiększyć efektywność pomiarową, umożliwiając wykonanie pomiaru "pod ruchem", bez dodatkowych zabezpieczeń i dostarczając wystarczającą ilość skanów w badanym profilu.

Przyjęto następujące ustawienia systemu pomiarowego:

- częstotliwość próbkowania: 300 kHz,
- ilość sampli w skanie: 1024,
- ilość bitów w samplu: 16,
- początek próbkowania sygnału: 96,5ns
- szerokość okna próbkowania sygnału: 10ns,
- wzmocnienie sygnału: 11dB,
- krok pomiarowy: 5cm.

Dla takich nastawów systemu pomiarowego przyjęto następującą metodykę pomiarów:

- przed rozpoczęciem zasadniczych pomiarów należy wygrzewać system w trybie "oscyloskop" przez co najmniej 30 minut, przy czym najlepsze efekty uzyskuje się po wygrzewaniu aparatury przez ok. dwie godziny (można zastosować stacking¹ sygnałów),
- przeprowadzić pomiar tła (tzw. sygnał powietrza) przez min. 15s,
- przeprowadzić pomiar sygnału odbitego z blachy w trybie "bouncing²" przez min. 15s,
- przeprowadzić pomiar statyczny sygnału odbitego z blachy przez min. 15s (antena w pozycji roboczej),
- wykonać pomiar zasadniczy.

¹ stacking – funkcja uśredniająca określoną przez operatora liczbę skanów

² tryb bouncing – pomiar sygnału odbitego w celu ustalenia amplitudy wychyleń anteny w pionie

Po pomiarach zasadniczych:

- przeprowadzić pomiar statyczny sygnału odbitego z blachy przez min. 15s (antena w pozycji roboczej),
- przeprowadzić pomiar sygnału odbitego z blachy w trybie "bouncing³" przez min. 15s,
- przeprowadzić pomiar tła (tzw. sygnał powietrza) przez min. 15s.

1.2 Wyniki badań z drugiej serii pomiarowej

Przedstawione wyniki są efektem oceny stanu połączeń międzywarstwowych wykonanych w warunkach drogowych w ramach drugiej, dodatkowej serii pomiarowej. Spośród licznych przykładów wybrano kilka najlepiej oddających możliwości i ograniczenia przyjętej metodyki.

Odcinek A_P

Prezentowane dane (Rysunek 1.1) pochodzą z pomiaru nawierzchni odcinka eksperymentalnego, na którym zasymulowano różne typy sczepności pomiędzy warstwami asfaltowymi: wiążącą i podbudowy (horyzont podkreślony przerywaną linią). Zmienną sczepność międzywarstwową uzyskano przez zmiany ilościowe zastosowanego skropienia, a brak sczepności zasymulowano przez aplikację pomiędzy warstwy pyłów z odpylania oraz zaczynu z gliny.

Prace nad ulepszeniem metodyki pomiaru i filtracji zarejestrowanych sygnałów sprawiły, że interpretacja jakościowa danych z drugiej serii pomiarowej z 2010 roku wskazuje jednoznacznie sekcje, na których występuje brak sczepności międzywarstwowej (sekcje 2, 3 i 4). W stosunku do danych uzyskanych w 2009 roku nastąpiła znaczna poprawa jakości sygnału, szczególnie na sekcjach 5 i 6, gdzie zgodnie z założeniami oczekiwano poprawnego powiązania między warstwami. Fragment sekcji 6 wskazany w interpretacji jako brak sczepności powinien być zweryfikowany przez wykonanie w tym miejscu odwiertu. Niestety ze względów formalnych (jest to droga gminna) nie udało się tego dokonać.

³ tryb bouncing – pomiar sygnału odbitego w celu ustalenia amplitudy wychyleń anteny w pionie



Rysunek 1.1 Odcinek A_P, echogram górny - pomiar w 2009 roku, echogram dolny – pomiar w 2010 roku. Oznaczenia: A – horyzont reprezentujący granicę między warstwą ścieralną a wiążącą, sekcje 1,5,6 i 7 - skropienie w różnych ilościach, sekcje 2,3 i 4 - brak sczepności osiągnięty przez zastosowanie odpowiednio: brak skropienia, zaczynu pylastego oraz zaczynu gliniastego. Linią przerywaną oznaczono odcinki gdzie wg. przyjętej metody interpretacji występuje brak sczepności pomiędzy warstwami.

Odcinek B_P

Kolejnym przykładem jest odcinek, na którym zidentyfikowano miejsca niepełnego połączenia warstwy wiążącej w miejscu wbudowanej siatki przeciwspękaniowej. Nawierzchnia odcinka została wyremontowana w 2008 roku. Na istniejącej nawierzchni wykonano nakładkę asfaltową o łącznej grubości około 12 cm, z wbudowaną (na głębokości 9 cm) siatką przeciwspękaniową z włókna szklanego (Rysunek 1.2a). Zastosowanie siatki bez specjalnej warstwy poślizgowej osłabiło połączenie warstw w tym miejscu i wraz z intensywnym ruchem pojazdów ciężarowych (obecnie około 2700 osi 100kN/pas/dobę) spowodowało utratę ich sczepności.

W celach porównawczych, w tej samej lokalizacji, pobrano próbkę z pasa awaryjnego (Rysunek 1.2b). Na podstawie oceny wizualnej stwierdzono, że stan połączenia w miejscu wbudowanej siatki przeciwspękaniowej jest dobry.



Rysunek 1.2 Rdzenie (o średnicy 10cm) pobrane w 2009 roku a) rdzeń 2a pobrany w śladzie prawego koła, na którym widoczny jest brak połączenia między górną i dolną warstwą wiążącą, b) rdzeń 2b pobrany w osi pasa awaryjnego - połączenie warstw oceniono wizualnie jako dobre

Echogram zarejestrowany w trakcie pomiarów na tym odcinku przedstawiono na Rysunku 1.3. Na całym odcinku wyraźnie widoczny jest podwójny refleks dodatni, w odległości 1,2-1,8 ns od powierzchni, reprezentujący brak połączenia warstw asfaltowych w miejscu wbudowanej siatki. Typ i znak refleksu wskazywałby na występowanie wody w strefie połączenia. Jednak z uwagi na kontrast prędkości falowej szkła i asfaltu można ewentualnie przypuszczać, że przyczyną takiego kształtu rejestrowanych sygnałów jest zastosowana siatka z włókien szklanych, powodująca lokalny spadek prędkości fali elektromagnetycznej.

Podobnie jak w przypadku odcinka E_P, horyzonty refleksyjne przebiegają tutaj równolegle do powierzchni zewnętrznej asfaltu. W związku z czym po zastosowaniu standardowej procedury "background removal" określenie typu refleksu (pojedynczy lub podwójny) oraz jego znaku (dodatni lub ujemny) nie jest pewne, ale interpretacja została potwierdzenia za pomocą odwiertu.



Rysunek 1.3 Odcinek B_P. Fragment echogramu (przetworzonego standardową procedurą "background removal") uzyskanego z pomiarów na odcinku o jednorodnej charakterystyce (refleks podwójny rejestrowany w tej samej odległości od powierzchni, na całym odcinku) wraz z lokalizacją odwiertu, obrazem oscyloskopowym pomiaru radarowego w miejscu odwiertu (okno czasowe 3,5ns) oraz zdjęciem rdzenia a (zdjęcie przeskalowane). Na całym odcinku widoczna para refleksów, odpowiadająca utracie połączenia warstw wiążących w miejscu wbudowanej siatki przeciwspękaniowej.

Odcinek C_P

Ciekawe wyniki uzyskano na odcinku o krótkim okresie eksploatacji. Konstrukcję nawierzchni stanowi pakiet warstw asfaltowych ułożonych na istniejącej, starej nawierzchni asfaltowej. Pomiędzy nowymi warstwami podbudowy i wiążącą wbudowano siatkę przeciwspękaniową.

Zarówno na echogramie jak i oscyloskopie wyraźnie widoczne są refleksy pojedyncze z granic między kolejnymi warstwami nowobudowanych warstw. Kłopot interpretacyjny sprawia refleks z granicy międzywarstwowej, w której występuje również siatka przeciwspękaniową. Zgodnie z opracowaną metodyką interpretacyjną refleks taki powinien mieć charakter refleksu podwójnego, i za taki można go uznać opierając się na echogramie, natomiast interpretacja obrazu oscyloskopowego nie jest już tak oczywista. Jak już wcześniej wykazywano siatki przeciwspękaniowe będą sprawiać trudność w prawidłowej ocenie stanu połączenia



Rysunek 1.4 P Fragment echogramu uzyskanego z pomiarów wraz z lokalizacją odwiertu, obrazem oscyloskopowym pomiaru radarowego w miejscu odwiertu (okno czasowe 3,5ns) oraz zdjęciem rdzenia (zdjęcie przeskalowane).

Odcinek D_P

Najtrudniejsze w ocenie są odcinki o długiej i "bogatej" historii. Nawierzchnie tego rodzaju odcinków są częstokroć bardzo niejednorodne i zdeformowane, co znacznie utrudnia chociażby podstawową interpretację danych, nie wspominając o tak subtelnych pomiarach jak próba oceny stanu połączenia między kolejnymi warstwami asfaltowymi.

Konstrukcja nawierzchni nie jest poddana zbyt dużemu obciążeniu ruchem (obecnie około 860 osi 100kN/pas/dobę), natomiast okres eksploatacji wynosi ponad 20 lat. Nawierzchnię stanowią warstwy asfaltowe o grubości ok. 16-18 cm, ułożone na warstwie betonu cementowego. Próbki nawierzchni (Rysunek 1.5 i Rysunek 1.6) pobrano w dwóch różnych miejscach oddalonych od siebie około 20 m, a ich lokalizację wybrano na

podstawie echogramu (Rysunek 1.7), który wskazywał na brak połączenia warstw w tych miejscach.

Próbka oznaczona literą a przedstawia przekrój konstrukcji nawierzchni, w której na głębokości 6 cm występuje pozioma strefa o znacząco innych własnościach niż warstwy nad nią i pod nią. Grubość tej strefy wynosi ok. 2,5 cm, a jej porowata struktura zbliżona jest do struktury pumeksu. Po przełamaniu warstwy uwidocznił się wilgotny, ilasty nalot o lekko brązowym zabarwieniu wypełniający wolne przestrzenie i otaczający ziarna kruszyw. Nalot ten jest prawdopodobnie wynikiem niszczenia ziaren wapiennego kruszywa w wyniku działania wody i niskich temperatur. Można przypuszczać, że atmosferyczny dwutlenek węgla zawarty w wodzie penetrującej asfalt znacznie przyspieszył erozję węglanowego kruszywa użytego do budowy tej nawierzchni, zaś lekko brązowe przebarwienie sugeruje udział tlenu w utlenianiu minerałów zawierających związki żelaza. Ponadto stwierdzono zmniejszoną ilość spoiwa asfaltowego (wskutek wymywania go przez wodę), które w przełamanej warstwie układało się w "pajęczą sieć" zamiast tworzyć jednolite powłoki otaczające pojedyncze ziarna. Nie stwierdzono braku połączenia pomiędzy warstwami asfaltowymi, a przełamanie rdzenia w strefie zmienionej mineralnie wykonano w laboratorium, bez użycia jakichkolwiek narzędzi, co świadczy o osłabieniu mechanicznym tej strefy.



Rysunek 1.5 Rdzeń a – na głębokości ok. 6 cm warstwa o grubości 2,5 cm o strukturze pumeksu. W przekroju warstwy widoczne efekty zniszczenia kruszywa oraz śladowe ilości lepiszcza.

Próbka oznaczona literą b przedstawia przekrój konstrukcji nawierzchni, w której występuje szczelina między warstwami asfaltowymi na głębokości ok. 9 cm. W strefie rozwarstwienia zwraca uwagę brak spoiwa i zupełnie odsłonięte kruszywo, prawdopodobnie na skutek działania wody. Wewnętrzny stan warstw, ich jakość i struktura oceniana wizualnie nie budzi zastrzeżeń.



Rysunek 1.6 Rdzeń b – brak połączenia w warstwie wiążącej, kruszywo na powierzchniach połączenia całkowicie odsłonięte (brak spoiwa).

Zarejestrowane dane radarowe z tego odcinka (Rysunek 1.7) jednoznacznie wskazują miejsce zmiany konstrukcji nawierzchni. Pierwszy odcinek, na którym pobrano rdzeń 3a, charakteryzuje się w miarę stabilnym sygnałem. Na odcinku tym widoczny jest dodatni refleks podwójny rejestrowany w odległości 0,8-1,4 ns od powierzchni. Według przyjętej metodyki interpretacyjnej taki obraz radarowy powinien wskazywać miejsce złego, zawilgoconego połączenia warstw asfaltowych. Tymczasem uzyskany obraz rdzenia a (Rysunek 1.5) wskazuje na co najmniej dobre połączenie wszystkich warstw asfaltowych. Niemniej charakterystyczną cechą badanej konstrukcji jest nietypowa, ze względu na swoją strukturę, strefa zaawansowanej degradacji materiału o grubość ok. 2,5 cm, występująca na głębokości 6 – 8 cm. To właśnie ta warstwa "generuje" sygnał o charakterystyce podobnej do tej, jaką się uzyskuje w miejscach, gdzie nastąpiła całkowita utrata połączenia. Można przypuszczać, że w trakcie pomiaru ta silnie porowata strefa była nasączona wodą.

Na drugim odcinku widoczny jest, podobnie jak na odcinku pierwszym, podwójny refleks dodatni zarejestrowany w odległości 1,7-2,1 ns od powierzchni. Refleks ten reprezentuje rozwarstwienie powstałe w 2/3 wysokości dolnej warstwy wiążącej (Rysunek 1.6). Widoczny na echogramie podwójny refleks dodatni (układ pików od góry: dodatni-ujemny, kolory czerwony-czarny) wskazuje na brak połączenia warstw oraz na występowanie wody w strefie rozwarstwienia na odcinku drogi o długości ok. 10 m.

Identyfikacja typu i znaku silnych refleksów podwójnych po przetworzeniu echogramu standardową procedurą "background removal" nie budzi tak poważnych wątpliwości, ponieważ przebieg horyzontów odpowiedzialnych za generację tych refleksów nie jest na długich odcinkach (porównywalnych z długością całego przekroju) równoległy do powierzchni drogi.



Rysunek 1.7 Fragment echogramu (przetworzonego standardową procedurą "background removal") uzyskanego z pomiarów na odcinku o zmiennej charakterystyce (przebieg refleksów nie jest równoległy do powierzchni na całym odcinku) wraz z lokalizacją odwiertów, obrazem oscyloskopowym pomiaru radarowego w miejscach odwiertów (okno czasowe 3,5ns) oraz zdjęciami rdzeni a i b (zdjęcia przeskalowane). Żółte markery na echogramie oznaczają miejsca zmiany konstrukcji nawierzchni.

Odcinek E_P

Ciekawe wyniki uzyskano na odcinku o relatywnie krótkim (około 7 lat), ale intensywnym okresie eksploatacji (obecnie około 3500 osi 100kN/pas/dobę). Konstrukcję nawierzchni stanowią warstwy asfaltowe o grubości ok. 26 cm, ułożone na warstwie mieszanki mineralnej stabilizowanej mechanicznie. Próbkę nawierzchni z tego odcinka przedstawiono na Rysunku 1.9a (rdzeń a), na którym widoczny jest brak połączenia pomiędzy górną i dolną warstwą wiążącą (na głębokości ok. 10,5 cm). W strefie połączenia zwraca uwagę brak spoiwa oraz duże wolne przestrzenie pomiędzy ziarnami kruszywa. Wcześniejsze odwierty wykonane na tym odcinku w 2007 roku wykazały utrzymujące się w strefach połączeń zawilgocenia. Na Rysunku 1.9b przedstawiono rdzeń b (pobrany w 2007 roku w okresie opadów deszczu, na przełomie jesieni i zimy), na którym zawilgocenia w strefach połączeń utrzymywały się długo po pobraniu i przewiezieniu próbki do laboratorium.

Zarejestrowany echogram z tego odcinka przedstawiono na Rysunku 1.10. Wyraźnie widoczne są dwa zakresy, głębokości w których następują zmiany zarejestrowanego sygnału. Pierwszy, w odległości 0,4-0,6 ns od powierzchni, reprezentuje granicę pomiędzy warstwą ścieralną, a górną warstwą wiążącą. W tym zakresie da się zauważyć pojawiające się i zanikające pary refleksów dodatni-ujemny (kolory czerwony-czarny, A), których największe amplitudy rejestrowano na dwóch odcinkach o długości 7-10 m

każdy. Uzyskany echogram sugeruje występowanie odspojenia na połączeniu warstwy ścieralnej i wiążącej. Tymczasem, oprócz wizualnie zaobserwowanej, zwiększonej ilości wolnych przestrzeni w dolnej strefie warstwy ścieralnej, pobrana próbka nawierzchni nie wykazała większych uszkodzeń. W drugim zakresie, w odległości 1,6-2,2 ns od powierzchni, obserwuje się refleks podwójny o znaku zmieniającym się wzdłuż profilu. Pozycja czasowa tego refleksu odpowiada granicy pomiędzy górną, a dolną warstwa wiążącą, co zostało potwierdzone pobranym rdzeniem. Widoczny na obrazie oscyloskopowym ujemny refleks podwójny (kolory czarny-czerwony, B) z miejsca pobrania próbki, wskazuje na brak połączenia nawierzchni na środkowym odcinku przekroju. Taki układ refleksów wskazuje również na brak wody w obszarze połączenia. polaryzacja sygnału na sąsiednich odcinkach sugeruje natomiast Odwrotna występowanie wody w strefie połączenia. Na odcinkach tych możliwy jest również brak połączenia obu warstw asfaltowych, lecz to należałoby potwierdzić poprzez pobranie próbki nawierzchni. Tym niemniej dane z wykonanego odwiertu (rdzeń a) jak i wcześniejsze dane archiwalne wskazują, że na całym odcinku mamy do czynienia z problemem właściwego powiązania warstw wiążących w strefie ich połączenia, które dodatkowo narażone jest miejscami na działanie penetrującej wody z pasa rozdziału nawierzchni. Omawiany echogram (Rysunek 1.10) pokazuje horyzonty refleksyjne przebiegające równolegle do powierzchni zewnętrznej asfaltu. W związku z tym kształt sygnałów refleksyjnych może ulegać istotnym deformacjom na skutek użycia standardowej procedury "background removal", przez co określenie typu refleksu (pojedynczy lub podwójny) oraz jego znaku (dodatni lub ujemny) nie jest pewne, a przypuszczenie musi być weryfikowane za pomocą oględzin rdzenia.



Rysunek 1.8 a) rdzeń 1a pobrany w 2009 roku (średnica rdzenia 10cm)– widoczny brak połączenia między górną i dolną warstwą wiążącą; na połączeniu brak spoiwa oraz duże wolne przestrzenie, b) rdzeń 1b pobrany w 2007 (średnica rdzenia 30cm, strzałkami oznaczono połączenia kolejnych warstw)– zdjęcie archiwalne, wykonane dwie doby po pobraniu próbki, na której widoczne są zawilgocenia w strefach połączeń



Rysunek 1.9 P Fragment echogramu (przetworzonego standardową procedurą "background removal") uzyskanego z pomiarów na odcinku o zmiennej charakterystyce wraz z lokalizacją odwiertu, obrazem oscyloskopowym pomiaru radarowego w miejscu odwiertu (okno czasowe 3,5ns) oraz zdjęciem rdzenia a (zdjęcie przeskalowane). Na echogramie widoczne są zmiany amplitudy i znaku refleksów odpowiadających połączeniu warstwy ścieralnej i wiążącej (odcinki o długości 7-10 m oznaczone jako A) oraz braku połączenia górnej warstwy wiążącej z dolną (odcinek oznaczono jako B)

2 Ocena zastosowanej techniki diagnostycznej pod kątem jakości uzyskiwanych wyników i ich znaczenia w ocenie trwałości istniejących konstrukcji

2.1 Matematyczny model sygnału refleksyjnego

Przyczyny, dla których sygnał refleksyjny powstający przy przejściu fali przez bardzo cienką szczelinę ma kształt zbliżony do pochodnej sygnału padającego zostały przestudiowane w oparciu o prosty model. Zakładamy tutaj, że szczelina ma postać płasko-równoległej warstwy wypełnionej ośrodkiem o przenikalności elektrycznej ε' i przenikalności magnetycznej μ' , ośrodek powyżej i poniżej szczeliny ma parametry ε oraz

 μ odpowiednio, zaś fala pada prostopadle na szczelinę odspojeniową i jest płaska. Amplitudowe współczynniki odbicia *r* i transmisji *t* (odnoszące się do zmiany amplitudy oscylacji pola elektrycznego) przy wejściu fali do szczeliny mają postać (Jackson, 1975):

$$r = \frac{p-1}{p+1}, \quad t = \frac{2}{p+1}; \qquad p = \sqrt{\frac{\mu\varepsilon'}{\mu'\varepsilon}}, \tag{1}$$

Współczynniki te spełniają następującą tożsamość dającą wyraz zasadzie zachowania energii:

$$pt^2 + r^2 = 1$$
 (2)

Natomiast przy wyjściu fali ze szczeliny amplitudowy współczynnik odbicia ma przeciwny znak r' = -r, a współczynnik transmisji ma zmienioną wartość $t' = p \cdot t$. Sygnał generowany na szczelinie $f_R(t)$ przez falę padającą $f_I(t)$ składa się z fali odbitej na powierzchni zewnętrznej $r \cdot f_R(t)$ (zwanej tutaj zerowym odbiciem zewnętrznym) oraz ciągu fal wielokrotnie odbitych wewnętrznie pomiędzy powierzchniami granicznymi szczeliny:

$$f_R(t) = r \cdot f_I(t - t_0) - t \cdot pt \sum_{i=1}^{\infty} r^{2i-1} f_I(t - t_0 - 2\frac{d}{v'} \cdot i)$$
(3)

I-ta fala tego ciągu powstaje w wyniku wejścia pierwotnej fali padającej do szczeliny, *2i*-1 odbić wewnętrznych i wyjścia na zewnątrz szczeliny, przez co pierwotny sygnał fl ulega modyfikacji o czynnik t $\cdot pt \cdot^{r2i-1}$ i zostaje opóźniony o $2d \cdot i/v'$ w czasie w stosunku do zerowego zewnętrznego odbicia; $v' = c/(\mu' \cdot \varepsilon')^{1/2}$ jest prędkością fali w ośrodku wypełniającym szczelinę. Ważną własnością fal wielokrotnie odbitych jest to, że wszystkie one mają przeciwny znak niż zerowe zewnętrzne odbicie, a ich sumaryczna amplituda (szereg geometryczny) ma na mocy wzoru (2) tę samą wartość, co odbicie zerowe:

$$t \cdot pt \sum_{i=1}^{\infty} r^{2i-1} = r \tag{4}$$

Średnie opóźnienie τ fal szeregu odbić wewnętrznych można policzyć używając amplitud jako wag przy średniowaniu:

$$\tau = \frac{\left[\sum_{i=1}^{\infty} r(r^2)^{i-1} \frac{2d}{v'} \cdot i\right]}{\sum_{i=1}^{\infty} r(r^2)^{i-1}} = \frac{2d}{v'} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{\infty} i \cdot (r^2)^{i-1}}{\sum_{i=1}^{\infty} (r^2)^{i-1}} = \frac{2d}{v'} \cdot \frac{1/(1-r^2)^2}{1/(1-r^2)} = \frac{2d/v'}{1-r^2}$$
(5)

Ponieważ jedynie kilka bądź kilkanaście pierwszych wyrazów szeregu odbić wewnętrznych ma istotne znaczenie amplitudowe, zaś opóźnienia czasowe $2d \cdot i/v'$ tych pierwszych fal z szeregu są wtedy znikome w relacji do charakterystycznego jej okresu T_c , fale te interferują konstruktywnie dając w wyniku sygnał zbliżony kształtem i amplitudą do zerowego odbicia zewnętrznego, ale opóźniony o czas τ i mający przeciwny znak niż odbicie zerowe:

$$f_{R}(t) \approx r \cdot f_{I}(t-t_{0}) - r f_{I}(t-t_{0}-\tau) \approx r \cdot \tau \cdot f_{I}'(t-t_{0}-\tau/2) = 2\frac{d}{v'} \cdot \frac{r}{1-r^{2}} \cdot f_{I}'(t-t_{0}-\tau/2)$$
(6)

W związku z tym interferencja tych dwóch składników (odbicia zerowego i sumy odbić wielokrotnych) jest w znacznej mierze destruktywna, gdyż efektywne opóźnienie τ jest także znikome w relacji do okresu T_c . Wypadkowy sygnał może być zatem skutecznie przybliżony za pomocą pochodnej po czasie sygnału padającego. W niektórych sytuacjach współczynnik odbicia jest znacząco niższy od jedności. Wtedy można zaniedbać mianownik w czynniku amplitudowym $r/(1-r^2) \approx r$ (gdy $r \ll 1$), zaś jeśli chcemy oszacować maksymalną amplitudę sygnału wypadkowego, można przybliżyć maksymalną wartość funkcji f'_I przez iloczyn częstości centralnej sygnału padającego $\omega_c = 2\pi/T_c$ oraz jego maksymalnej wartości f_I/max , przy czym $\lambda_c = v' \cdot T_c$:

$$f_R \mid_{\max} = 2\frac{d}{v'} \cdot \frac{r}{1-r^2} \cdot f_I' \mid_{\max} \approx 2\frac{d}{v'} \cdot r \cdot \omega_c f_I \mid_{\max} = 4\pi \frac{d}{\lambda_c'} r \cdot f_I \mid_{\max}$$
(7)

Wzór ten pozwala zatem na szacowanie efektywnej amplitudy sygnału generowanego przez cienką warstewkę. W typowej sytuacji terenowej fala padająca na szczelinę $f_i(t)$ jest słabsza od sygnału wzorcowego w(t), zaś sygnał odbity $f_R(t)$ jest także osłabiany w wyniku przejścia przez horyzonty pośrednie, w tym przede wszystkim w wyniku dwukrotnego przejścia przez powierzchnię zewnętrzną drogi. Dodatkowy czynnik osłabienia amplitudy $\gamma \approx t_s \cdot p_s \cdot t_s = 1 - r_s^2$ ma zatem wartość rzędu 80%.

$$g_{R}^{Double} \mid_{\max} \approx \gamma \cdot 4\pi \frac{d}{\lambda_{c}'} \frac{r}{1 - r^{2}} \cdot w_{I} \mid_{\max} \quad \approx \gamma \cdot 4\pi \frac{d}{\lambda_{c}'} r \cdot w_{I} \mid_{\max} \approx g_{N}$$
(8)

Symbol $w_l|_{max}$ oznacza tutaj maksymalną amplitudę sygnału wzorcowego uzyskiwanego jako odbicie od blachy (przy podobnym czasie powrotu), zaś g_R^{Double} to rejestrowana amplituda refleksu podwójnego. Porównując tę amplitudę z poziomem szumów g_N , bądź z poziomem innych sygnałów zaburzających echogram (amplituda tła maskującego) otrzymujemy kryterium wykrywalności warstewki. Odpowiednio, rejestrowana amplituda refleksu pojedynczego g_R^{Single} , pochodzącego od horyzontu międzywarstwowego (bez odspojenia) ma w tym modelu postać:

$$g_{R}^{Single}|_{\max} = \gamma \cdot r \cdot w_{I}|_{\max} \approx g_{N}, \qquad (9)$$

a wartość tę należy porównać (tak jak poprzednio) z poziomem zaburzeń maskujących g_N , żeby otrzymać odpowiednie kryterium wykrywalności piku pojedynczego. Szum elektromagnetyczny o wysokiej częstotliwości ma w warunkach terenowych rozmaitą amplitudę $g_N/w_I|_{max} \approx 10^{-2}$,..., 10^{-1} . Szum ten jest niekoherentny w czasie i może być skutecznie redukowany za pomocą stackingu, aczkolwiek typowy sprzęt GPR nie daje możliwości przeprowadzenia prawidłowego stackingu, chociaż potencjalnie taki sposób rejestracji mieści się w granicach jego wydajności. W przypadku tła maskującego, czyli sygnału resztkowego procedury *"background removal"* poziom zakłóceń $g_N/w_I|_{max}$ jest rzędu kilku procent. Usprawnienie tej procedury pozwala zmniejszyć go do około jednego procentu. Wzór (6) określający krytyczny warunek detekcji szczeliny skutecznie pokazuje dlaczego antena 2 GHz potrafi wykryć szczelinę suchą o szerokości rzędu kilku dziesiątych części milimetra. Testy laboratoryjne pokazały, że sygnał znamionujący

obecność szczeliny o szerokości pojedynczych milimetrów jest wystarczająco silny, aby mógł być zarejestrowany i zinterpretowany nawet w warunkach terenowych. Szczeliny o szerokości części milimetra również dają sygnał rejestrowalny i silniejszy od szumów występujących w terenie, ale przy obecnym stanie techniki usuwania tła maskującego występuje trudność w odróżnieniu refleksu podwójnego od pojedynczego. W warunkach terenowych wysoka, umożliwiająca detekcję amplituda refleksów podwójnych jest spotykana często. Zawdzięczamy ją między innymi obecności wody w szczelinach odspojeniowych oraz temu, że refleksy takie bywają również generowane nie przez cienkie szczeliny, ale przez istotnie grubsze, silnie porowate strefy silnie zdegradowanego materiału, często nasączonego wodą.

Refleks pojedynczy nazywany jest w roboczej terminologii dodatnim jeśli ma znak zgodny z refleksem powstającym przy odbiciu od metalowej blachy, czyli odpowiada on horyzontowi kontrastu materiałowego, z ośrodkiem o niższej prędkości leżącym niżej. Odpowiednio refleks ujemny odpowiada przeciwnemu kontrastowi materiałowemu. Jeśli przyjmiemy, że refleks pojedynczy w(t) ma jeden pik centralny (kształt taki ułatwia identyfikację refleksu i przypisanie mu czasu powrotu), to refleks podwójny dw(t)/dttakiego systemu GPR ma dwa wiodące amplitudowo piki. Refleks podwójny nazywamy dodatnim, jeśli pierwszy pik z pary wiodących ekstremów jest dodatni (czyli ma taki znak jak pik wiodący dodatniego refleksu pojedynczego) i refleks tego typu jest właściwy takiemu ośrodkowi wypełniającemu szczelinę, który ma prędkość mniejszą niż ośrodek otoczenia. W przypadku nawierzchni drogowych jest to na przykład sytuacja szczeliny w asfalcie, wypełnionej woda. Odpowiednio refleks podwójny nazywamy ujemnym, jeśli pierwszy pik wiodącej amplitudowo pary ekstremów jest ujemny, co odpowiada szczelinie wypełnionej materiałem o większej prędkości niż w otoczeniu, na przykład szczelinie suchej, czyli wypełnionej powietrzem, albo szczelinie wypełnionej sypkim suchym porowatym materiałem. Jak widać odróżnienie typu refleksu i identyfikacja jego znaku ma fundamentalne znaczenie diagnostyczne i własności te mogą być konfrontowane z wynikami wierceń.

2.2 Analiza porównawcza danych uzyskanych przy pomocy opracowanego modelu matematycznego i standardowych procedur filtrowania sygnału

Jednym z przykładów ilustrujących jakościowe różnice wyników po zastosowaniu standardowej i autorskiej metody post-processingu sygnału radarowego jest echogram uzyskany z pomiarów na odcinku testowym A_P. Prezentowane dane (Rysunek 2.1) pochodzą z pomiaru nawierzchni odcinka eksperymentalnego, na którym zasymulowano różne typy sczepności pomiędzy warstwami asfaltowymi: wiążącą i podbudowy (horyzont B).

Na górnym echogramie przedstawiono wynik usuwania tła przy pomocy standardowej procedury "background removal". Standardowa wersja tej procedury (odejmowanie sygnału uśrednionego po wcześniejszym wykonaniu "time-zero correction") nie jest wystarczająco elastyczna w usuwaniu głównych składników tła i sygnał resztkowy, po nieprawidłowo usuniętym sygnale maskującym, pozostaje głównym czynnikiem zaburzającym zarejestrowane sygnały. Możliwe są jednak usprawnienia tej procedury podwyższające czytelność echogramu, co przedstawiono na dolnym echogramie.

Uzyskany przekrój strukturalny ukazuje, oprócz powierzchni granicznej warstwy asfaltowej i podbudowy (silny czerwony refleks pojedynczy dodatni oznaczony literą C), wyraźnie widoczne dwa horyzonty w pakiecie warstw asfaltowych (oznaczone literami A i B). Porównanie obu echogramów pozwala stwierdzić, że nastąpiła poprawa jakości całego obrazu. Największą poprawę obserwuje się w części najbliższej powierzchni tj. w odległości 0-1,5 ns. W tym obszarze rejestrowana jest granica między warstwą ścieralną a wiążącą, która na echogramie dolnym jest wyraźnie lepiej widoczna, szczególnie na odcinku 90-110m. Ponadto obraz echogramu dolnego rozwiewa watpliwości co do interpretacji rodzaju refleksu z tej granicy, szczególnie na odcinkach 10-45m i 115-145m – na całym odcinku mamy do czynienia z refleksem pojedynczym dodatnim. W przypadku standardowej procedury "background removal" (Rysunek 2.1, górny), refleks ten byłby z łatwością zinterpretowany na tych odcinkach jako podwójny, z powodu deformacji jego kształtu przy odejmowaniu sygnału uśrednionego w tej procedurze. Deformacja taka ma miejsce szczególnie w takich sytuacjach, kiedy horyzont odbijający przebiega na dłuższym odcinku równolegle do zewnętrznej (górnej) powierzchni asfaltu. Sygnał średni staje się wtedy podobny do lokalnego sygnału na tym odcinku, co przy odejmowaniu prowadzi do poważnego zaburzenia kształtu. Modyfikacja metody przetwarzania poprzez zdefiniowanie tła w sposób niezależny od sygnału średniego (Rysunek 2.1, dolny) pozwoliła na usunięcie tego zjawiska. Nastąpiła wtedy również poprawa jakości refleksów odpowiadających granicy między warstwą wiążącą a podbudowy, tj tam gdzie symulowano różne stany połączeń. Na odcinku 25-125m rodzaj refleksu interpretować należy jako podwójny ujemny, co oznacza złe połączenie obu warstw. Interpretacja taka jest zgodna z układem sekcji, na których zasymulowano brak połączenia. Na echogramie górnym natomiast są odcinki, na których refleks z tej granicy mógłby być traktowany jako pojedynczy ujemny (odcinki 25-55m i 125-145m) lub pojedynczy dodatni (odcinek 55-75m), co w rzeczywistości byłoby błędną interpretacją stanu połączenia.



Rysunek 2.1 Fragment echogramu uzyskanego z pomiarów na odcinku eksperymentalnym A_P. Obraz górny uzyskano przez zastosowanie standardowej procedury "background removal", natomiast dolny przez zastosowanie metody autorskiej. Oznaczenia: A – granica między warstwą ścieralną, a wiążącą, B - granica między warstwą wiążącą, a podbudowy asfaltowej, C - granica między warstwą podbudowy asfaltowej, a podbudowy niezwiązanej.

Kolejnymi przykładami ograniczeń standardowej procedury "background removal" są echogram uzyskany z pomiarów na odcinkach C_P (Rysunek 2.2) i E_P (Rysunek 2.3). Na obu rysunkach profile górne przedstawiają echogramy poddane standardowej procedurze, natomiast dolne są wynikiem zastosowania autorskiej metody.

Na odcinku C_P widoczna jest wyraźna poprawa jakości sygnału odbitego z granicy pomiędzy warstwami asfaltowymi (na Rysunku 2.2 oznaczono literą A). Na dolnym echogramie sygnał ten jest stabilny i nieprzerwany, dzięki czemu możliwa jest łatwa interpretacji jakościowa i ilościowa. Zwiększenie jakości uzyskanego echogramu pozwoliło również na zidentyfikowanie sygnału (na Rysunku 2.2 oznaczono literą B) charakterystycznego dla granicy warstw z złym połączeniem międzywarstwowym.

Podobną jak na odcinku C_P poprawę jakości sygnału zarejestrowano na odcinku E_P (Rysunek 2.3). Na dolnym echogramie wyraźnie widoczne są granice pomiędzy warstwami ścieralną i wiążącą, dzięki czemu interpretacja może być przeprowadzona efektywnie i szczegółowo.



Rysunek 2.2 Echogram uzyskanego z pomiarów na odcinku C_P. Echogram górny uzyskano przez zastosowanie standardowej metody, natomiast echogram dolny po zastosowaniu metody autorskiej. Oznaczenia: A – granica między warstwami asfaltowymi – na echogramie górnym sygnał wyraźnie :poprzerywany"; B - granica między warstwami asfaltowymi – sygnał na dolnym echogramie wskazuje na brak sczepności pomiędzy warstwami.



Rysunek 2.3 Fragment echogramu uzyskanego z pomiarów na odcinku eksperymentalnym E_P. Echogram górny uzyskano przez zastosowanie standardowej metody, natomiast echogram dolny po zastosowaniu metody autorskiej. Oznaczenia: A – granica między warstwą ścieralną a wiążącą, B - granica między warstwą wiążącą a podbudową asfaltową. Wyraźnie widoczna, zdecydowana poprawa jakości echogramu dolnego.

Jednym z przykładów wskazujących na znaczne polepszenie jakości uzyskiwanych danych może być echogram zarejestrowany na odcinku B_P (Rysunek 2.4). Na echogramie dolnym, przedstawiającym wynik zastosowania nowej metody filtracji, zarejestrowane sygnały są stabilne i nieprzerywane. Chociaż nie przeprowadzono w tym

miejscu szczegółowej interpretacji, potwierdzonej odwiertem, to jednak można z powodzeniem przyjąć, że dolny echogram przedstawia prawdopodobny układ warstw na tym fragmencie badanego odcinka.



Rysunek 2.4 Fragment echogramu uzyskanego z pomiarów na odcinku B_P. Echogram górny uzyskano przez zastosowanie standardowej metody, natomiast echogram dolny po zastosowaniu metody autorskiej. Na dolnym echogramie wyraźnie widoczna poprawa jakości echogramu. Zarejestrowane sygnały odpowiadają prawdopodobnemu układowi warstw.

2.3 Ocena znaczenia uzyskiwanych wyników w ocenie trwałości istniejących konstrukcji

W ostatnich latach ocena stanu połączenia pomiędzy warstwami asfaltowymi nabiera coraz większego znaczenia (Tschegg, i inni, 2007), (Kruntcheva, i inni, 2006), (Raab C, i inni, 2004). W wielu projektach stan połączenia określany jest bezpośrednio po wybudowaniu nawierzchni, natomiast kwestia zmian właściwości połączeń w czasie badana była w bardzo ograniczonym zakresie (Raab, i inni, 2009).

Jak się wydaje monitorowanie tego parametru nawierzchni może okazać się istotne dla jej trwałości, szczególnie, że jak podają między innymi (Jaskuła, 2009) (Judycki J, 2003), niewystarczające powiązanie między warstwami powoduje większe ugięcia konstrukcji, zwiększając odkształcenia i naprężenia rozciągające w dolnych częściach warstw. Brak połączenia jest też czynnikiem zmniejszającym odporność konstrukcji na niszczące działanie penetrującej wody (Sybilski, i inni, 2008).

Symulacji rozkładu odkształceń i naprężeń przy pełnej sczepności warstw asfaltowych oraz przy jej braku dokonano między innymi w pracy (Judycki, i inni, 2003) (Rysunek 2.5). Uzyskane w tych symulacjach dane pokazują zasadnicze różnice rozkładu odkształceń i naprężeń w warstwach asfaltowych gdzie nie ma prawidłowego połączenia międzywarstwowego. Ta niekorzystna charakterystyka pracy nawierzchni oraz

powtarzalność obciążeń generowanych przez koła pojazdów ciężkich sprawia, że strefa połączenia szybko ulega degradacji, powodując znaczne obniżenie trwałości konstrukcji (Judycki J, 2003) (Rysunek 2.6).



Rysunek 2.5 Symulacja stanu nawierzchni obciążonej osią 115 kN: rysunek a) odkształcenia, rysunek b) - naprężenia nawierzchni pod kołem pojazdu przy pełnej sczepności międzywarstwowej i przy jej braku.



Rysunek 2.6 Symulacja trwałości zmęczeniowej nawierzchni w zależności od sczepności (na podstawie opracowania (Judycki J, 2003)).

3 Podsumowanie

W ramach niniejszej pracy, składającej się z trzech etapów, zrealizowano szereg badań i analiz, mających na celu poznanie możliwości wykorzystania techniki radarowej w ocenie stanu połączeń międzywarstwowych. Większość z przeprowadzonych badań miała charakter poznawczy i w związku z tym realizowana była głownie w warunkach laboratoryjnych. Zwieńczeniem doświadczeń zebranych w laboratorium były pomiary terenowe, które zostały przeprowadzone na wytypowanych odcinkach w dwóch seriach: zasadniczej – wykonanej w 2009 roku oraz dodatkowej – wykonanej w 2010 roku w celu oceny jakości uzyskiwanych danych pomiarowych. Wyniki analiz, badań laboratoryjnych i obu serii terenowych przedstawiono w odpowiednich sprawozdaniach, natomiast wnioski dotyczące zastosowania GPR w ocenie połączeń międzywarstwowych zaprezentowano poniżej.

Stosowanie nowoczesnych technik pomiarowych niesie za sobą wiele wyzwań. Współczesne systemy GPR pozwalają na szybkie i ciągłe zbieranie danych o konstrukcji nawierzchni, a oferowane przez nie parametry pozwalają na ocenę nawierzchni zarówno nowych jak i już istniejących bez konieczności kosztownych zamknięć ruchu. Ponadto badaniom można poddać dłuższe sekcje bez ograniczeń czasowych i utrudnień w ruchu. Wyzwaniem w stosowaniu techniki radarowej jest interpretacja uzyskanych danych. Jest to niezwykle trudna część całego procesu, wymagająca przede wszystkim dużego doświadczenia osoby przygotowującej i oceniającej zebrane dane.

W prawidłowej ocenie danych szczególnie istotna jest **jakość plików kalibracyjnych**. W opracowanej przez autorów niniejszego opracowania metodyce pomiarowej szczególny nacisk kładzie się na staranność i dokładność pomiarów kalibracyjnych. Okazuje się, że są to kluczowe elementy redukujące zakres zastosowanego postprocessingu i znacznie poprawiające jakość uzyskiwanych danych. Niestety wymagana staranność i częstotliwość pomiaru sygnałów kalibracyjnych powoduje znaczne zmniejszenie efektywności samego pomiaru.

Technika georadarowa ma znaczące możliwości w identyfikacji odspojeń, jeśli są one rozległe i rozwinięte na tyle, że tworzą otwarte (puste lub wypełnione materiałem obcym: powietrze, woda, materiał ilasty, itp.), połogie (rozciągające się rozlegle w kierunkach poziomych) szczeliny o grubości rzędu pojedynczych milimetrów. Jak pokazują testy laboratoryjne i proste rachunki, taka cienka wewnętrzna lamina powoduje powstawanie sygnału odbitego o charakterze piku podwójnego, czyli istotnie różnego w swym kształcie od prostego piku pojedynczego odzwierciedlającego połogi kontrast materiałowy na granicy dwóch warstw o znaczniejszej miąższości. Znak piku podwójnego pozwala na ocenę znaku kontrastu prędkości falowej pomiędzy laminą, a materiałem otaczającym.

W przypadku nawierzchni drogowych zdarzają się przypadki, w których refleks podwójny jest powodowany odstępem (wewnętrzną laminą) pomiędzy warstwami asfaltu lub wewnątrz warstwy. Wyniki wierceń pokazują jednak, że nie mniej typowe są przypadki kiedy refleks podwójny jest skutkiem istotnych zmian materiałowych w postaci warstwowej strefy (o grubości sięgającej nawet kilku centymetrów) wewnątrz nawierzchni asfaltowej. Zarówno w przypadku cienkich lamin jak i w przypadku nieco szerszych stref degradacji ważne znaczenie przy generacji piku podwójnego ma obecność wody w wysoko-porowatej strefie zniszczeń. W odróżnieniu od stref suchych, którym zazwyczaj towarzyszy podwójny pik ujemny, te same **strefy zawilgocone charakteryzują się pikiem podwójnym dodatnim o istotnie większej amplitudzie bezwzględnej** dającej tym samym wyższe potencjalne możliwości wykrycia defektu. W ocenie autorów sytuacja zawilgocenia szczelin na połączeniach międzywarstwowych i stref degradacji jest zjawiskiem powszechnie występującym w warunkach terenowych.

Najpoważniejsze ograniczenie w skuteczności diagnostycznej bierze się z trudności w usuwaniu tła maskującego sygnał strukturalny. Niewystarczająco skuteczne usuwanie tła (standardowa procedura "background removal") prowadzi między innymi do istotnych kłopotów w odróżnieniu piku pojedynczego od podwójnego. Wstępne testy pokazały potrzebę dalszych badań nad przyczynami tych trudności, w celu rozwoju koncepcji usuwania tła maskującego. Jedną z tych koncepcji może być dekonwolucja, która pozawala na kilkukrotne poprawienie rozdzielczości czasowej przy rozróżnianiu zinterferowanych sygnałów odbitych. Obecnie rozdzielczość ta jest na poziomie dziesiątej części okresu fali, czyli istotnie przekracza rozdzielczość uważaną za nominalną.

Badania laboratoryjne, mające na celu określenie możliwości zastosowanego systemu pomiarowego, wskazują na szereg ograniczeń zastosowania tej metody pomiarowej do oceny stanu połączenia warstw nawierzchni. Ze względu na trudności z określeniem fizycznej przyczyny generowania refleksu podwójnego wyłącznie na podstawie echogramu wydaje się, że metoda GPR niekoniecznie jest (stanie się) samodzielna technika diagnostyczną rozstrzygającą stanie połączenia 0 międzywarstwowego, szczególnie w przypadku nowych, nierozwiniętych pęknięć, którym nie towarzyszą rozstąpienia (rozwarcia) szczeliny. Natomiast technika ta daje nadzwyczaj obiecujące rezultaty w przypadku szczelin szerokich oraz w przypadku stref zaawansowanego zniszczenia mechaniczno-chemicznego, które jak się wydaje powstają wzdłuż szczeliny po pewnym czasie.

Przeprowadzone w ramach niniejszej pracy badania ugięciomierzem dynamicznym FWD wykazały, że istnieje duży potencjał tej metody w ocenie stanu połączenia, pod warunkiem przeprowadzenia szczegółowych symulacji i analiz zjawisk falowych zachodzących podczas pomiaru. Jak pokazały przeprowadzone badania porównawcze metoda FWD w obecnym kształcie niesie ze sobą dosyć duży pierwiastek przypadkowości. Z uwagi na popularność wykorzystania urządzenia w ocenie stanu istniejących nawierzchni istotne byłoby dopracowanie metodyki, która w przyszłości mogłaby się stać uzupełnieniem metody radarowej.

W ocenie autorów wart podkreślenia jest fakt, że znaczna część wytypowanych na odcinkach terenowych miejsc, w których wskazywano na problem prawidłowego połączenia miedzywarstwowego, została pozytywnie potwierdzona wykonanymi odwiertami. Dotyczy to szczególnie odcinków o nawierzchniach relatywnie nowych, o uporządkowanym, niezdeformowanym układzie warstw. Tym samym, istnieją przesłanki, które wskazują, że GPR będzie znakomitym uzupełnieniem innych metod zarówno bezpośrednich jak i bezinwazyjnych.

Możliwość oceny nawierzchni pod kątem utraty połączenia międzywarstwowego jest szczególnie ważna w przypadku nowych, oddawanych do użytku nawierzchni. Takie "potwierdzenie" jakości nawierzchni z oczywistych względów jest szalenie istotne w osiągnięciu odpowiedniej jakości dróg, a tym samym polepszeniu komfortu jazdy. W takim zakresie zastosowań technika radarowa w ocenie autorów jest **bezkonkurencyjna**.

Uwzględniając potencjalne możliwości techniki radarowej przedstawione nie tylko w niniejszej pracy, ale również literaturze zagranicznej, za stosowne wydaje się kontynuowanie prac nad doskonaleniem techniki w ocenie połączeń oraz wprowadzaniem nowych zagadnień dotyczących miedzy innymi oceny stanu zagęszczenia czy jednorodności układu nowych warstw asfaltowych. Taki kierunek można uznać za oczywisty, uwzględniając niedawne inwestycje GDDKiA w poszerzenie infrastruktury badawczej (trzy nowe systemy GPR). Wykorzystanie tego potencjału badawczego dałoby nowym ekipom możliwość zdobycia tak potrzebnego doświadczenia koniecznego w interpretacji uzyskiwanych danych.

Bibliografia

Jackson J D Classical Electrodynamics. - [s.l.] : John Wiley & Sons., 1975. - Vol. Second Edition.

Jaskuła P Wpływ braku sczepności międzywarstwowej na wartość modułów sztywności warstw asfaltowych obliczonych na podstawie wyników ugięć z aparatu FWD [Conference] // IV Miedzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym. - Poznań : Fundacja na rzecz rozwoju Politechniki Poznańskiej, 2009. - pp. 103-112.

Judycki J and Jaskuła P Analiza stanu naprężeń, odkształceń i ugięć w nawierzchni asfaltowej wykonanej na niskim nasypie posadowionym na słabonośnym gruncie // Kielce?. - Kielce : IBDiM, 2003.

Judycki J Sczepność miedzy warstwami asfaltowymi nawierzchni [Article] // Drogownictwo. - wrzesień 2003. - pp. s. 275-279.

Kruntcheva M R., Collop A C. and Thom N H. Properties of asphalt concrate layer interfaces. - [s.l.] : Journal of Materials in Civil Engineering, 2006. - Vol. Vol. 18. - pp. pp. 467-471.

Raab Christiane and Partl Manfred N Interlayer bonding of binder, base and subbase layers fo asphatl pavements: Long-term performance // Construction and Building Materials. - [s.l.] : Elsevier, 2009. - Vol. 23.

Raab C and Partl M.N. Interlayer shear performance experience with different pavement structures [Conference] // Euroasphalt and Eurobitume Congress. - Viena : [s.n.], 2004.

Sybilski D [et al.] Ocena przyczyn uszkodzeń nawierzchni autostrady A2 (Sekcje 2 i 3) oraz wskazanie sposobu naprawy i wzmocnienia nawierzchni // raport niepublikowany. - Warszawa : Instytut Badawczy Dróg i Mostów, 2008.

Tschegg E K [et al.] Mechanical and fracture-mechanical properties of asphaltconcrate interfaces. - [s.l.] : ACI Materials Journal , 2007. INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW Zakład Diagnostyki Nawierzchni

ZAŁĄCZNIK

"Echogramy z pomiarów radarowych".