

NAWIERZCHNIA DROGOWA

Wpływ wybranych czynników na pomierzone ugięcia oraz na wyniki identyfikacji modułów sztywności przy wykorzystaniu ugięciomierza dynamicznego FWD

tekst: mgr inż. PIOTR UNIWERSAŁ, doktorant Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej

Rosnące wymagania, jakie stawiamy nawierzchniom drogowym, powodują potrzebę opracowywania coraz bardziej precyzyjnych technik badawczych w zakresie szacowania ich nośności. Takim wymaganiom mogą sprostać ugięciomierze dynamiczne FWD, które z wysoką dokładnością mierzą ugięcie nawierzchni wywołane dynamicznym uderzeniem. Zwiększającej się popularności pomiarów czaszy ugięć, spowodowanej większą dostępnością takich badań oraz rosnącymi wymaganiami zamawiających, nie towarzyszy wzrost świadomości, jak prawidłowo wykonać ten pomiar oraz opracować wyniki badania ugięć nawierzchni. W artykule poruszono kilka zagadnień związanych z pomiarami ugięć, w tym wpływ temperatury warstw asfaltowych, dokładności inwentaryzacji układu i rodzaju warstw konstrukcji nawierzchni oraz wpływ metody, jaką przeprowadzane są obliczenia modułów sztywności i sprężystości warstw nawierzchni.

1. Wprowadzenie

W literaturze [1, 4, 7] można znaleźć wiele opisów, jak powinno wyglądać prawidłowe wykonanie badania FWD, natomiast brak jest normy, która regulowałaby sposób wykonania pomiaru oraz obliczeń modułów sztywności warstw nawierzchni. Najnowsze i najbardziej szczegółowe wytyczne dotyczące wykonania badania FWD znajdują się w załączniku D1 *Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów – wytyczne stosowania* [1], w którym określono następujące warunki prowadzenia pomiaru:

- średnia temperatura pakietu warstw asfaltowych w trakcie wykonywania pomiaru ugięć nawierzchni powinna zawierać się w przedziale od 5 do 25 °C;
- pomiar w połowie grubości pakietu warstw asfaltowych, w otworze zalanym cieczą zapewniającą dobry kontakt termiczny (olej, gliceryna), po ustabilizowaniu temperatury w otworze lub zastosowanie alternatywnej metody określania temperatury warstwy asfaltowej – metoda typu BELLS;
- pomiar temperatury należy przeprowadzić na początku oraz na końcu serii pomiarów FWD;
- w przypadku zmian temperatury powietrza o więcej niż 5 °C lub czasu trwania pomiarów przekraczającego cztery godziny należy wykonać dodatkowy pomiar temperatury;
- we wszystkich punktach pomiaru FWD należy rejestrować temperaturę powietrza oraz temperaturę powierzchni jezdni;
- na nawierzchni w miejscu pomiaru FWD nie powinna znajdować się stojąca woda, a podłoże gruntowe nie może być zamrożone.

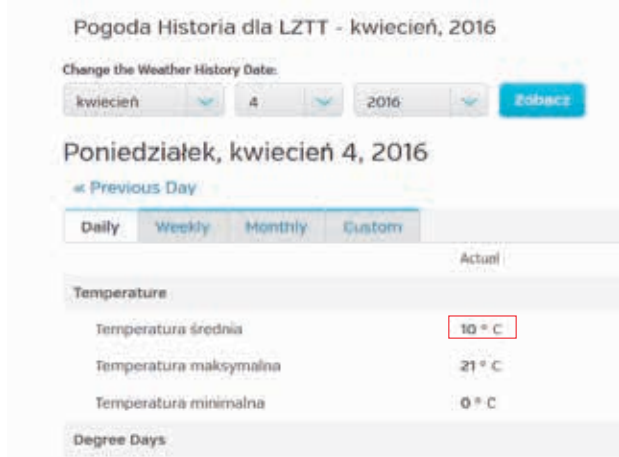
Zauważyć można, że w załączniku D1 sprecyzowano wymagania co do temperatury warstw asfaltowych w trakcie pomiaru oraz sposobu i czasu jej mierzenia. Pomiar temperatury powietrza oraz temperatury powierzchni wykonywany

jest automatycznie za pomocą czujników zamontowanych w ugięciomierzu dynamicznym FWD podczas wykonywania pomiaru ugięcia nawierzchni. W celu zapewnienia prawidłowych odczytów czujników temperatury należy przynajmniej raz w roku prawidłowo przeprowadzić kalibrację czujników według instrukcji producenta urządzenia.

Pomiar temperatury w środku warstw asfaltowych wymaga natomiast ręcznego wykonania odwiertu kontrolnego na głębokość stanowiącą połowę grubości warstw asfaltowych, ale nie głębiej niż na 12 cm. Konieczna do tego jest znajomość grubości warstw asfaltowych przed wykonaniem badania nośności lub, jeśli istnieje, sprawdzenie dokumentacji konstrukcji nawierzchni dla badanego odcinka. W przypadku nowych nawierzchni, z pełną i aktualną dokumentacją, ustalenie głębokości otworu do pomiaru temperatury nie stanowi żadnego problemu. Jednak częściej pomiar nośności odbywa się na drogach, które nie posiadają udokumentowanego układu i rodzaju warstw nawierzchni, na jakich wykonywano doraźne remonty lub występują na nich koleiny. Wówczas grubość konstrukcji w miejscu pomiaru jest trudna do ustalenia, nawet gdy wykonano wcześniej odwierty kontrolne na badanym odcinku. Częstą przyczyną tego stanu rzeczy bywa duża zmienność grubości warstw asfaltowych na długości drogi.

Dodatkowe wymagania podane w załączniku D1, takie jak pomiar co cztery godziny i przy zmianie temperatury o ponad 5 °C, mają za zadanie zapewnić jak najlepszą informację o temperaturze wewnątrz warstw asfaltowych. Jednakże w słoneczny dzień różnice temperatury między miejscami zacienionymi a nasłonecznionymi potrafią być znaczne, co prowadzi do tego, że temperatura zmierzona w odwiercie kontrolnym i rzeczywista temperatura wewnątrz warstw asfaltowych mogą być różne. Inną dopuszczoną metodą ustalenia temperatury wewnątrz

warstw asfaltowych jest metoda BELLS. Polega ona na ustaleniu temperatury wewnątrz warstw asfaltowych na podstawie danych o pogodzie z dnia poprzedzającego dokonanie pomiaru oraz pomierzonych temperatur nawierzchni. Informacja o średniej temperaturze z dnia poprzedniego uzyskiwana jest z informacji na portalu internetowym, np. www.wunderground.com, z zaznaczeniem miejsca pomiaru (ryc. 1).



Ryc. 1. Średnia temperatura powietrza z dnia poprzedzającego pomiar, zaznaczona czerwonym prostokątem

2. Analizy wpływu sposobu uwzględniania temperatury na wartość modułów sztywności nawierzchni

W celu zbadania wpływu sposobu uwzględniania temperatury na wartość modułów sztywności nawierzchni wykonano trzy warianty obliczeń, w których rozpatrzono możliwości pomiaru temperatury w środku warstw asfaltowych, pomiaru temperatury nawierzchni oraz według metody BELLS. Obliczenia modułu sztywności nawierzchni dokonano na podstawie wyników pomiarów temperatury wykonanych na odcinku drogi wojewódzkiej nr 971 w 36 punktach pomiarowych. Konstrukcja nawierzchni badanego odcinka drogi składa się z warstwy asfaltowej o grubości 155 mm i warstwy podbudowy (kruszywa) o grubości 250 mm. Pomiar temperatury przeprowadzono na początku i na końcu badań w odwiercie badawczym wykonanym w konstrukcji nawierzchni. Wartość zmierzonej temperatury wyniosła 25 °C. Do obliczeń metodą BELLS przyjęto średnią temperaturę z dnia poprzedzającego pomiar, która wynosiła 10 °C. Zawarty w programie algorytm korzysta z pomiaru temperatury powietrza i nawierzchni w konkretnym punkcie, podając jako wynik temperaturę wewnątrz warstw asfaltowych. Średnia temperatura wewnątrz warstw asfaltowych obliczona metodą BELLS to 19,7 °C. Średnia temperatura powietrza w trakcie pomiaru wynosiła 24,7 °C, a powierzchni nawierzchni – 27,2 °C.

Bazowe moduły sztywności wszystkich warstw obliczono dla temperatury zmierzonej w wykonanym odwiercie, a moduły sztywności warstw asfaltowych przeliczono z uwzględnieniem temperatury referencyjnej 13 °C. Obliczenia przeprowadzono metodą dopasowania czaszy ugięć. Program, wykonując kolejne iteracje modułów sztywności warstw dla wprowadzonej konstrukcji, dąży do jak najlepszego dopasowania obliczeniowej czaszy ugięć do pomierzonej w trakcie badań. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Moduły sztywności warstw nawierzchni obliczone dla różnych metod ustalania temperatury

Metoda pomiaru temperatury	Średnia wartość modułu sztywności [MPa]			Odniesienie do wartości bazowej [%]		
	Warstwy asfaltowe	Podbudowa	Podłoże	Warstwy asfaltowe	Podbudowa	Podłoże
Pomiar wewnętrznych warstw asfaltowych (wariant bazowy)	3307	200	73	100	100	100
Pomiar temperatury powierzchni asfaltowych	4021	198	73	122	99	100
Temperatura przeliczona metodą BELLS	2414	200	73	73	100	100

Wyniki obliczeń można wyeksportować do arkusza kalkulacyjnego, dla każdego punktu prezentowane są moduły warstw wraz z podaniem temperatury, dla jakiej zostały obliczone oraz przeliczone do przyjętej temperatury referencyjnej. Różnica w wynikach obliczeń modułów pomiędzy różnymi metodami pomiaru temperatury zarysowuje się w warstwach asfaltowych, których moduł sztywności zależy od temperatury. Przy przyjęciu do obliczeń temperatury powierzchni nawierzchni wzrosły do 122% wartości bazowej, a przy przeliczeniu metodą BELLS obniżyły się do 73% wartości bazowej. Warstwa kruszywa i podłoża gruntowego jest niewrażliwa na wpływ temperatury, stąd też wyniki różnią się tylko minimalnie między sobą ze względu na delikatne różnice w iteracjach wykonywanych w czasie obliczeń. Wystąpienie dużych różnic w wartościach modułów sztywności warstw asfaltowych będzie skutkowało różnicą w obliczaniu pozostałej trwałości zmęczeniowej czy projektowaniu wymaganej nakładki wzmacniającej.

3. Analiza wpływu dokładności pomiaru grubości warstw konstrukcji nawierzchni na wartość ich modułów sztywności

Kolejnym zagadnieniem wymagającym doprecyzowania jest wprowadzenie wartości grubości warstw konstrukcji do obliczenia modułów sztywności warstw konstrukcji nawierzchni. Zgodnie z *Katalogiem przebudów i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych* [4], pomiar grubości warstw konstrukcji należy wykonać z dokładnością do 1 mm, jednak taka dokładność pomiaru w odniesieniu do warstw z kruszywa lub podłoża gruntowego jest trudna do osiągnięcia. Raczej za wskazane i realne należy uznać podawanie wyniku pomiaru grubości tych warstw z dokładnością do pełnych centymetrów. Ponadto zdarza się, że wyniki pomiaru grubości warstw z odwiertów podawane do obliczeń są dużo mniej dokładne, tzn. z dokładnością do pełnych centymetrów dla warstw asfaltowych i nawet z dokładnością do pełnych decymetrów dla warstw głębiej zalegających. Dodatkowo, w przypadku istniejących nawierzchni możliwe jest, że grubość konstrukcji nawierzchni w kolejnych punktach badawczych znacznie odbiega od tej, jaka jest w miejscu wykonania odwiertu. Większa

Tab. 2. Moduły sztywności warstw nawierzchni obliczone dla różnych grubości warstw konstrukcji

Wariant konstrukcji		Średnia wartość modułu sztywności [MPa]			Odniesienie do wartości bazowych [%]		
Grubość warstwy asfaltowej [mm]	Grubość warstwy podbudowy [mm]	Warstwy asfaltowe	Podbudowa	Podłoże	Warstwy asfaltowe	Podbudowa	Podłoże
155*	250*	3307	200	73	100	100	100
150		3429	211	70	104	105	97
160		3169	193	74	96	97	102
155	200	3240	245	73	98	123	101
	300	3341	177	73	101	88	100
150	200	3352	259	72	101	130	99
	300	3483	183	71	105	92	98
160	200	3144	231	73	95	116	100
	300	3204	169	74	97	84	102

* wariant bazowy

zgodność byłaby możliwa przy zwiększeniu gęstości wykonywanych odwiertów, a także mogłaby się zwiększyć przez wykonanie badań georadarem GPR. Ciągły pomiar grubości warstw konstrukcji nawierzchni techniką radarową daje możliwość identyfikacji konstrukcji nawierzchni w każdym punkcie pomiarowym [3, 8]. Niestety, badania GPR są w Polsce jeszcze słabo rozpowszechnione, zatem badania nośności wykonywane na drogach, które mają bardzo zmienną konstrukcję, wielokrotnie miejscowo remontowaną oraz skoleinowaną, obciążone są zawsze pewnym błędem [6].

Na potrzeby artykułu wykonano obliczenia modułów sztywności warstw konstrukcji nawierzchni odcinka drogi wojewódzkiej nr 971, wariantując dokładność grubości poszczególnych warstw. Grubość warstw asfaltowych określono w zaokrągleniu do pełnych centymetrów, zaś warstw kruszywowych w zaokrągleniu do pełnych decymetrów, stosując zarówno zaokrąglenia w górę, jak i w dół. W wypadku warstw asfaltowych przyjęto wariantowo grubości 150 i 160 mm, a dla warstw kruszywowych – 200 i 300 mm. Rozpatrzono także różne kombinacje grubości poszczególnych warstw. Obliczenia wykonano za pomocą programu ELMOD, z zastosowaniem metody dopasowania czaszy ugięć. We wszystkich wariantach obliczeń wyznaczono procentową zmianę wartości modułów wyznaczonych dla wariantu bazowego o parametrach: grubość warstwy asfaltowej 155 mm o współczynniku Poissona 0,30, grubość warstwy podbudowy 250 mm o współczynniku Poissona 0,30, poniżej podłoże gruntowe o współczynniku Poissona 0,35, temperatura warstw asfaltowych podczas pomiaru 25 °C, przeliczona do temperatury referencyjnej 13 °C. Wyniki obliczeń zaprezentowano w tabeli 2.

Zmiana grubości warstw asfaltowych o 5 mm w górę lub dół ma największy wpływ na moduł sztywności warstw asfaltowych. Jest to odpowiednio 104% modułu bazowego dla konstrukcji o 5 mm cieńszej i 96% dla konstrukcji o 5 mm grubszej. Wpływ zmiany grubości warstw asfaltowych na moduły sztywności pozostałych warstw jest podobnej wielkości. Zmiana grubości podbudowy ma wpływ na moduł sztywności zarówno podbudowy, jak i warstw asfaltowych. Zmniejszenie grubości podbudowy do 200 mm powoduje spadek modułu sztywności warstw asfaltowych do 98% modułu bazowego i wzrost modułu podbudowy do 123% modułu bazowego. Zwiększenie grubości podbudowy do 300 mm wywołuje odwrotny efekt, czyli przyrost modułu

sztywności warstw asfaltowych do 101% wartości bazowej i obniżenie modułu podbudowy do 88% wartości bazowej.

Widoczna jest zależność odwrotnie proporcjonalna grubości warstwy do modułu jej sztywności, a zaokrąglenie grubości dowolnej warstwy konstrukcji może zmienić wartości obliczanych modułów sztywności każdej z warstw. W przypadku kombinacji różnych wariantów konstrukcji (różnych grubości warstw asfaltowych i podbudowy), podanych w tabeli 2, największa różnica to 105% modułu bazowego dla warstw asfaltowych i 130% modułu bazowego dla podbudowy. Podane wartości modułów sztywności są wartościami średnimi, wyznaczonymi dla całego pomiaru. Pojedyncze różnice dla konkretnych punktów mogą być jeszcze większe.

4. Analiza wpływu metody obliczeniowej na wartość modułów sztywności warstw konstrukcji nawierzchni

Do wyznaczania modułów sztywności poszczególnych warstw konstrukcji nawierzchni mogą być stosowane różne metody obliczeniowe, często zaaplikowane do programów komputerowych umożliwiających opracowanie wyników pomiarów [2, 5]. W wypadku ugięciomierza dynamicznego FWD Dynatest stosowany jest program ELMOD, oferujący różne metody wyznaczania modułów sztywności warstw nawierzchni drogowych.

Najpopularniejszą metodą jest dopasowanie czaszy ugięć. Metoda ta polega na kolejnych iteracjach wartości modułów sztywności poszczególnych warstw, przy ustalonych ich grubościach i wartościach współczynnika Poissona, zależnych od materiału warstwy. Liczba iteracji oraz moduł początkowy, od którego rozpoczyna się obliczanie, są określane przez użytkownika. Kolejną metodą, która jest dostępna w programie ELMOD, to metoda równoważnej grubości (ang. *Method of Equivalent Thickness*, MET), opracowana przez Odemarka [10]. Bazuje ona na zmodyfikowanym równaniu Bussinesq’a, odniesionym do półprzestrzeni wielowarstwowej. Następną metodą została sformułowana w ramach teorii liniowej sprężystości (ang. *Linear Elastic Theory*, LET). W metodzie tej stosowane są liniowe zależności między odkształceniami i naprężeniami przy założeniu nieskończenie małych odkształceń. W programie ELMOD może być także stosowana metoda elementów skończonych (ang. *Finite Elements Method*, FEM), w której w budowie numerycznego modelu 2D fragmentu wielowarstwowej konstrukcji

nawierzchni wykorzystuje się jego symetrię względem pionowej osi (budowa połowy modelu), co pozwala zmniejszyć liczbę elementów. Możliwe jest zastosowanie automatycznej lub własnej dyskretyzacji.

Poniżej (tab. 3) przedstawiono wyniki obliczeń modułów sztywności warstw konstrukcji nawierzchni opisanego wyżej odcinka drogi wojewódzkiej nr 971, uzyskane przy zastosowaniu opisanych powyżej czterech metod obliczeniowych.

Tab. 3. Moduły sztywności warstw nawierzchni obliczone dla różnych metod obliczeniowych

Metoda obliczeń	Średnia wartość modułu sztywności [MPa]			Odniesienie do wartości bazowych [%]		
	Warstwy asfaltowe	Podbudowa	Podłoże	Warstwy asfaltowe	Podbudowa	Podłoże
Metoda dopasowania czaszy ugięć*	3307	200	73	100	100	100
Metoda elementów skończonych (FEM)	4151	153	52	126	76	72
Teoria liniowej sprężystości (LET)	5288	73	120	160	36	166
Metoda równoważnej grubości (MET)	3355	217	53	101	109	73

* wariant bazowy

Największą zbieżność wyników uzyskano, stosując metodę dopasowania czaszy ugięć (metoda bazowa) i metodę równoważnej grubości, największa różnica między tymi metodami widoczna jest w module sztywności podłoża. Wyniki uzyskane przy zastosowaniu pozostałych dwóch metod (FEM i LET) są zdecydowanie różne od pierwszych dwóch. Zastosowanie metod FEM i LET w obliczeniu modułów sztywności warstw wymaga indywidualnej oceny ich przydatności. Należy podkreślić, że zaprezentowane wyniki dotyczą oprogramowania tylko jednego producenta ugięciomierzy dynamicznych FWD. Inni producenci tego urządzenia opracowali swoje programy, istnieją również programy autorskie [5, 11, 12, 13].

5. Podsumowanie

Badania stanu nawierzchni ugięciomierzem dynamicznym FWD dają możliwość określenia nośności nawierzchni na podstawie punktowego pomiaru jej sprężystego ugięcia. Należy jednak zauważyć, że błędy lub niedokładności w określaniu temperatury warstw asfaltowych oraz ich grubości mają wpływ na wynik obliczeń modułów sztywności tych warstw konstrukcji. Znaczenie ma także zastosowana metoda obliczania modułu sztywności na podstawie pomierzonych wartości sprężystych ugięć nawierzchni. Wykorzystując metody bazujące na różnych teoriach i stosujących różne założenia i uproszczenia, można uzyskać bardzo rozbieżne wyniki obliczeń. W konse-

kwencji może to skutkować przewymiarowaniem konstrukcji nawierzchni lub, co gorsze, jej niedowymiarowaniem.

Warunkiem uzyskania wiarygodnych informacji dotyczących nośności badanej nawierzchni drogowej jest przestrzeganie procedur w zakresie wykonywania pomiaru jej sprężystych ugięć. W szczególności odnosi się to do pomiaru temperatury oraz grubości poszczególnych warstw konstrukcji nawierzchni drogowej, a także do wyboru odcinków jednorodnych [9]. Podając wyniki obliczeń modułów sztywności warstw, należy określić metodę obliczeniową, która została zastosowana w przetwarzaniu wyników pomiarów.

Sugeruje się również coroczną kalibrację urządzeń pomiarowych u ich producenta, tak by pomiar czaszy ugięć wykonany przez różne urządzenia nie był obciążony brakiem bezwzględnej kalibracji, nieopierającej się na porównywaniu wyników osiągniętych przez urządzenia na odcinkach próbnych. Dalsze działania powinny dążyć do ujednoczenia metody przeprowadzania badań czaszy ugięć i obliczania modułów sztywności, tak aby wyniki pomiarów i obliczeń były miarodajne. Wartościowe byłoby również wykonanie porównania wyników obliczeń z pomiaru czaszy ugięć z wynikiem badań laboratoryjnych modułów sztywności próbek pobranych z warstw nawierzchni poddanych badaniom ugięć.

Literatura

- [1] *Diagnostyka stanu nawierzchni – wytyczne stosowania*. Załącznik do Zarządzenia nr 34 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z 30 kwietnia 2015 r.
- [2] Firlej S.: *Wyznaczanie parametrów modelu nawierzchni drogowej z dynamicznych badań FWD*. Monografia Politechniki Lubelskiej. Lublin 2015.
- [3] Judycki J., Jaskuła P.: *Diagnostyka i modernizacja konstrukcji nawierzchni drogowych*. Materiały 56. Konferencji Naukowej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB. Kielce–Krynica, wrzesień 2010, s. 233–252.
- [4] *Katalog przebudów i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych*. IBDiM. Warszawa 2013.
- [5] Krawczyk B.: *Identyfikacja parametrów modeli nawierzchni drogowych na podstawie impulsowych testów dynamicznych*. Praca doktorska. Wrocław 2012.
- [6] *Wpływ dokładności identyfikacji konstrukcji nawierzchni na wymiarowanie wzmocnienia dróg*. Red. T. Mechowski. IBDiM. Warszawa 2006.
- [7] Piłat J., Radziszewski P.: *Nawierzchnie asfaltowe*. WKŁ. Warszawa 2007.
- [8] Sudyka J., Mechowski T., Harasim P.: *Nowoczesne metody oceny stanu nawierzchni w utrzymaniu sieci drogowej*. Materiały IV Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej *Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym*. Poznań, wrzesień 2009, s. 206–214.
- [9] Szydło A., Krawczyk B.: *Identyfikacja jednorodnych odcinków konstrukcji nawierzchni*. „Drogi i Mosty” 2013, t. 12, nr 3, s. 269–281.
- [10] Ullidtz P.: *Modelling flexible pavement response and performance*. Polyteknisk Forlag, 1998.
- [11] <http://www.dynatest.com/software/elmod.aspx> (dostęp 12 lipca 2016)
- [12] <http://www.pavement-consultants.com/> (dostęp 12 lipca 2016)
- [13] <http://www.erikuab.com/pavement-software/> (dostęp 12 lipca 2016)

