



MICHAŁ A. GLINICKI

Instytut Podstawowych
Probleatów Techniki
PAN, Warszawa
mglinic@ippt.pan.pl

Materialowe aspekty równości nawierzchni betonowej

Tematyka równości nawierzchni drogowych jest często podejmowana w publikacjach, także w „Drogownictwie”. Przede wszystkim podejmowane są zagadnienia metodyczne i interpretacyjne, związane ze specyfiką pomiarów równości oraz znaczącymi konsekwencjami oceny równości. Niekorzystna ocena równości na nowym odcinku wpływa na odrzucenie robót lub w szczególnym przypadku na ewentualne potrącenia dla wykonawcy, natomiast w odniesieniu do dróg użytkowanych świadczy o określonym stopniu jej zużycia, kwalifikującym do remontu. Wynika to z pierwszorzędного znaczenia, jakie przypisuje się równości, uznawanej za kluczowy wskaźnik funkcjonalności nawierzchni, obok szorstkości, nośności konstrukcji i trwałości materiałowej. Debaty na temat równości mają szerszy zasięg i obejmują nie tylko środowisko inżynierów, ponieważ subiektywne odczucie większego lub mniejszego komfortu jazdy samochodem prowokuje również laików do wyrażania opinii.

Przedmiotem artykułu są związki między technologią budowy i równością nawierzchni drogowej, przede wszystkim na drogach klasy A, S i GP. Omówienie materiałowych aspektów równości dotyczy nawierzchni niezbrojonych, dyblowanych i kotwionych, wykonanych w technologii betonu cementowego, a zwłaszcza w technologii układania ślizgowego. Jest to nowoczesna, wydajna technologia pozwalająca na ułożenie warstwy nawierzchniowej w sposób monolityczny, przy jednym przejeździe maszyny [1]. Różni się zasadniczo od alternatywnej technologii układania nawierzchni asfaltowych. Dlatego warto omówić specyfikę technologii ślizgowej, przeanalizować możliwości optymalizacji materiałowej i wskazać narzędzia do zapewnienia jakości.

Wymagana równość nawierzchni

Nie ma powodów, aby różnicować wymagania równości nawierzchni wykonanych w różnych technologiach. Znajduje to odbicie w formalnych wymaganiach wyrażonych w rozporządzeniu [2] i dokumentach GDDKiA. Najczęściej stosowaną metodą wyznaczania równości, zarówno podłużnej, jak i poprzecznej, jest metoda profilometryczna. Polega na rejestracji geometrycznego profilu nawierzchni na badanym odcinku w postaci odchylek od teoretycznej niwelety nawierzchni.

Spośród różnych miar równości podłużnej [3], najbardziej rozpowszechnione jest stosowanie wskaźnika IRI [mm/m],

tj. międzynarodowego wskaźnika równości. Wskaźnik charakteryzuje pracę układu zawieszenia w obliczeniowym modelu pojazdu samochodowego podczas przejazdu po nierówności nawierzchni. Rejestracja profilu nierówności nawierzchni odbywa się w sposób ciągły, ale wskaźnik IRI wyznacza się umownie dla każdego 50-metrowego odcinka, a następnie określa się wartość miarodajną na odcinku 1000 m. Dopuszczalne wartości wskaźnika IRI na nawierzchniach dróg klasy A, S i GP w Polsce podano w tabeli 1. Wymagana równość podłużna jest określona przez dopuszczalną wartość średnią pomiarów IRI_{sr} oraz dopuszczalną wartość maksymalną pojedynczego pomiaru IRI_{max} . W specyfikacji technicznej GDDKiA dotyczącej nawierzchni z betonu cementowego, tzw. WWiORB [4], podano odpowiednie wskazówki metodyczne, obejmujące przypadki szczegółowe (krótki odcinek, nawierzchni, miejsce występowania dylatacji mostowej) oraz omówiono wyznaczanie równości poprzecznej. Kryterium IRI_{sr} wg. tabeli 1 zostało uszczegółowione i zaokrąglone do 1,1 mm/m w odniesieniu do zasadniczych pasów ruchu. Jak wcześniej zapowiedziano, szczegółowa dyskusja metodyki interpretacji pomiarów równości jest poza zamierzonym zakresem niniejszego artykułu.

Tabela 1. Dopuszczalny przy odbiorze graniczny wskaźnik IRI określony metodą profilometryczną na jezdniach dróg klasy A, S i GP zgodnie z [2]

Element nawierzchni jezdni	Dopuszczalne odbiorcze wartości wskaźników dla zadanego zakresu długości odcinka drogi [mm/m]	
	IRI_{sr}	IRI_{max}
Pasy ruchu zasadnicze, awaryjne, dodatkowe, włączenia i wyłączenia, jezdnie łącznic	≤ 1,3	≤ 2,4
Jezdnie miejsc obsługi podróżnych	≤ 1,5	≤ 2,7

Tabela 2. Graniczny wskaźnik IRI nawierzchni betonowej, odpowiadający premii dla wykonawcy, 100% zapłacie i potrąceniom od zapłaty, na podstawie [5]

Wskaźnik IRI [mm/m]	Górna granica premii	Dolna granica 100% zapłaty	Górna granica 100% zapłaty	Dolna granica potrąceń	Górna granica potrąceń	Granica programu naprawczego
min	0,63	0,63	0,85	0,85	1,07	0,95
max	1,10	1,12	1,47	1,47	2,21	2,37
średni	0,89	0,89	1,13	1,14	1,50	1,53

Zgodnie z amerykańską praktyką budowy nawierzchni [5], jej równości podłużnej przypisuje się bardzo duże znaczenie. Dlatego ponad 90% stanów stosuje system premii motywacyjnych dla wykonawców, aby zachęcić do układania nawierzchni supergładkich. W tabeli 2 zestawiono graniczne wartości wskaźnika IRI, odpowiadające przyznaniu premii za bardzo dobrą równość wykonanej nawierzchni, a także naliczeniu potrąceń od zapłaty. Premiowane odcinki nawierzchni są wynagradzane w wysokości od 102 do 115% zapłaty, ale niektóre stany stosują kwotowe premie lub potrącenia stałe, obliczane na ogół na odcinkach 0,1 mili czyli około 160 metrów. Aby wykrywać lokalne nierówności na odcinkach znacznie krótszych niż przy użyciu profilografu stosuje się dodatkowe kryteria oceny równości. Alternatywne kryteria identyfikujące lokalne nierówności obejmują:

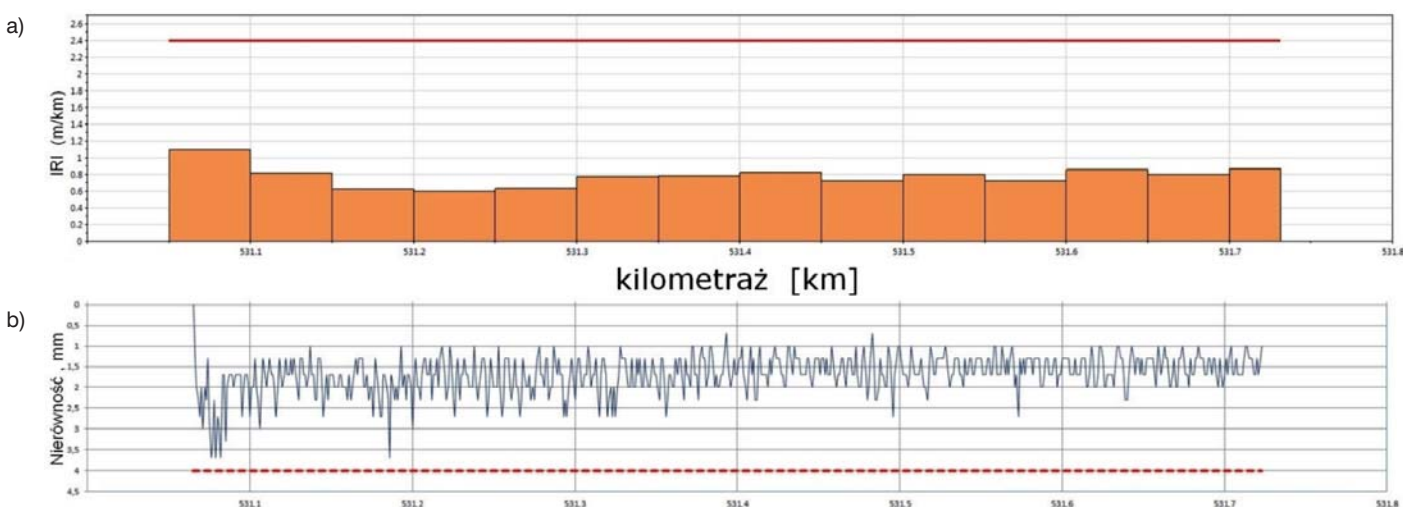
- odchylenie łąty pomiarowej od 3 do 6 mm, odpowiednio przy długości łąty 4,8 m i 3 m;

- odchyłka w zakresie od 7 do 10 mm w przypadku komputerowej symulacji pomiaru profilografem na odcinku 7,5 m;
- wskaźnik IRI w granicach od 1,58 do 2,37 mm/m przy jego wyznaczeniu na odcinkach o długości od 7,5 do 16 m.

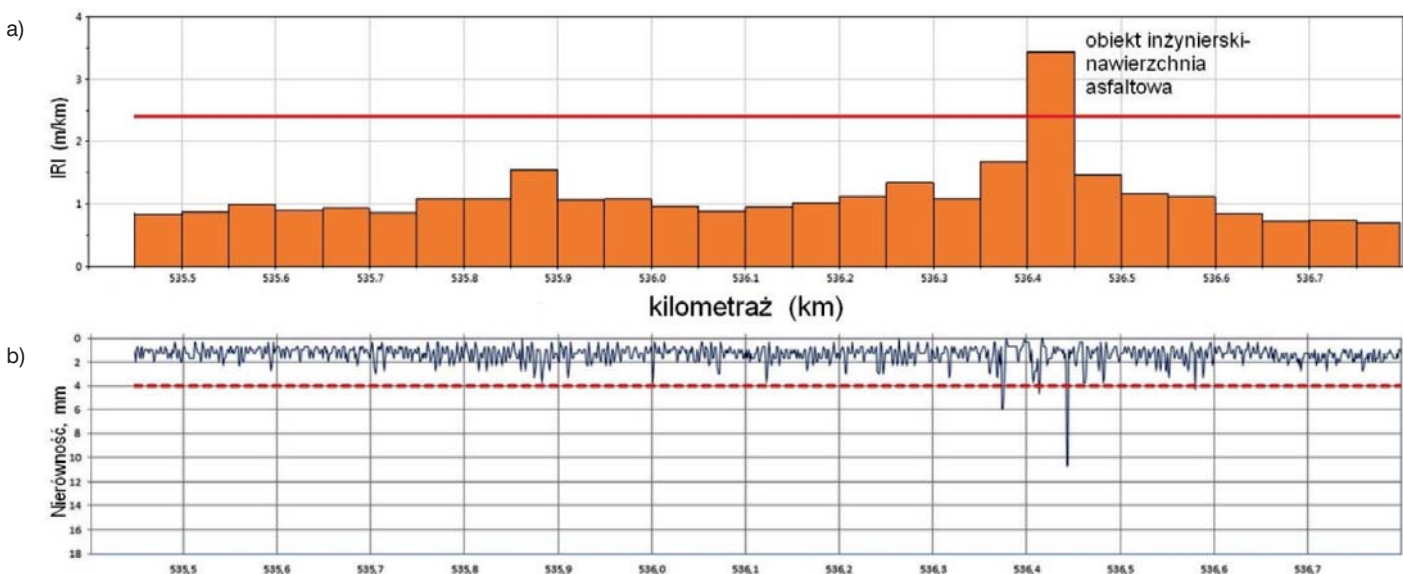
Zamiast programów naprawczych w takich miejscach często stosuje się redukcję ceny kontraktowej.

Równość podłużna nawierzchni dyblowanej i kotwionej, ze zróżnicowaną teksturą

Do wizualizacji i interpretacji pomiarów równości nawierzchni podłużnej często stosuje się bezpłatne oprogramowanie ProVAL [6], opracowane pod patronatem Amerykańskiej Federalnej Administracji Drogowej FHWA. Program pozwala importować dane pomiarowe z różnych



Rys. 1. Wyniki pomiaru równości podłużnej na odcinku nawierzchni betonowej: a) wskaźnik IRI na podstawie pomiarów profilometrem RSP, b) profil nierówności sporządzony przy użyciu oprogramowania ProVAL [1]



Rys. 2. Wyniki pomiaru równości podłużnej na fragmencie odcinka nawierzchni betonowej oraz nawierzchni asfaltowej na dojazdach do obiektu inżynierskiego i na obiekcie: a) wskaźnik IRI na podstawie pomiarów profilometrem RSP, b) profil nierówności sporządzony przy użyciu oprogramowania ProVAL



Fot. 1. Widok nawierzchni betonowej wykonanej metodą ślizgową z teksturą odkrytego kruszywa na odcinku drogi klasy S i kategorii ruchu KR7 (fot. własna autora)

profilometrów, w tym m.in. z popularnego w Polsce profilografu RSP prod. Dynatest, a następnie obliczać rozmaite wskaźniki równości i analizować profil na wiele sposobów [7], m.in. poprzez symulacje pomiarów planografem lub łata.

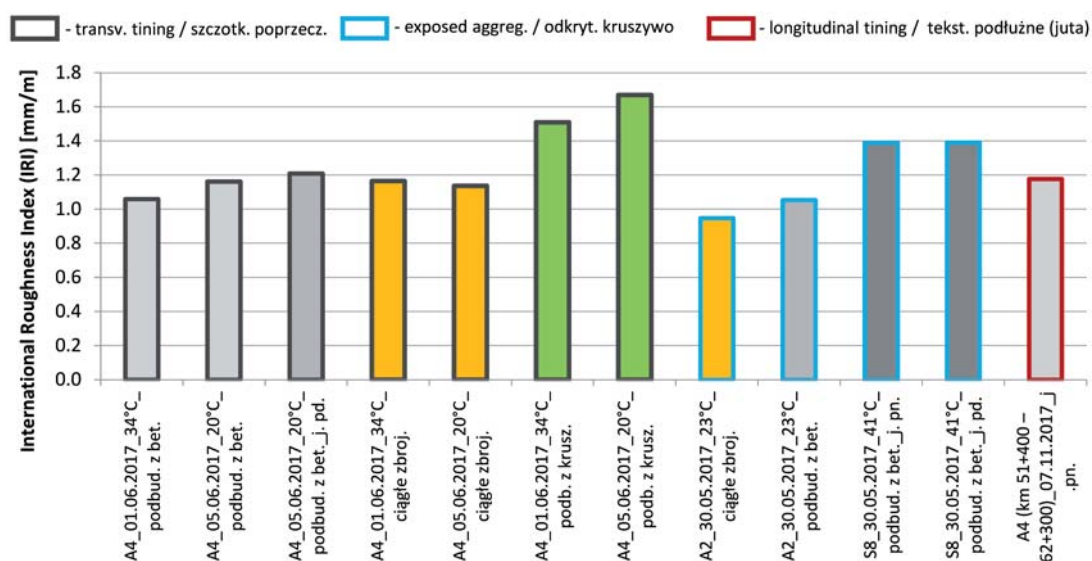
Na fotografii 1 pokazano widok przykładowego odcinka nawierzchni betonowej na drodze klasy S, wykonanej w technologii ślizgowej z teksturą kruszywa odkrytego w regionie północno-wschodniej Polski. Nawierzchnia została zaprojektowana dla kategorii ruchu KR7 na 30-letni okres eksploatacji. Na rysunku 1 zamieszczono rezultaty pomiaru równości podłużnej na reprezentatywnym fragmencie odcinka tej nawierzchni. Wskaźnik IRI został wyznaczony na podstawie pomiarów profilometrem RSP; linią ciągłą pokazano wskaźnik dopuszczalny według tabeli 1. Na rysunku 1b zilustrowano profil nierówności – wyniki pomiarów świadczą o znakomitej równości podłużnej na tym odcinku.

Nierówność nawierzchni na dojazdach do obiektu inżynierskiego i na obiekcie, w porównaniu z równością odcinka nawierzchni betonowej, jest wyraźnie wyodrębniona na wykresach (rys. 2). Choć wskaźnik IRI uśrednia równość na odcinku 50 m, to analiza profilu zmierzonego co 0,5 m pozwala na dokładne wskazanie miejsca występowania lokalnej nierówności.

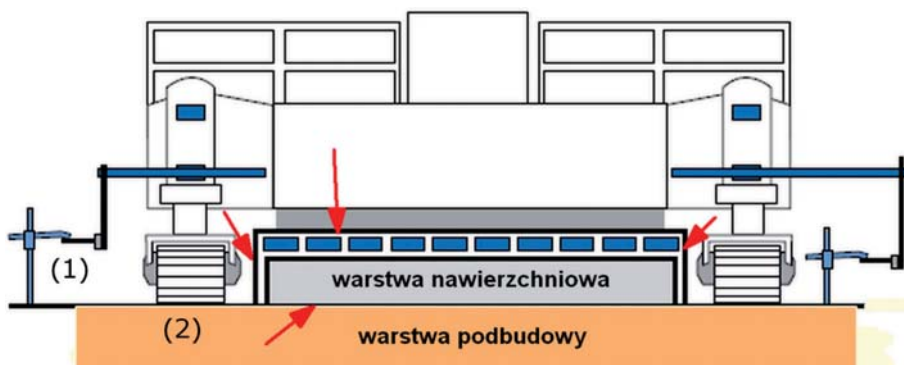
Porównanie równości nawierzchni betonowych na wybranych odcinkach krajowych autostrad i dróg ekspresowych przedstawiono w [8]. Badane nawierzchnie zostały powierzchniowo wykończone za pomocą szczotkowania poprzecznego, ciągniętej juty oraz w technologii odkrytego kruszywa. Na odcinkach nawierzchni autostrady A4, wykonanych jako nawierzchnia ze zbrojeniem ciągłym oraz jako nawierzchnia dylatowana-dyblowana na podbudowie z kruszywa, stwierdzono średni wskaźnik IRI odpowiednio 1,15 mm/m i 1,2–1,6 mm/m. Porównanie wskaźników wskazuje wyraźnie lepszą równość podłużną odcinka ze zbrojeniem ciągłym. Stosunkowo duże rozrzuty pomiarów IRI stwierdzono na odcinku A4 po 20-letniej eksploatacji: skrajne wartości IRI mieściły się w granicach od 0,7 do 1,8 mm/m. Porównanie wskaźnika IRI na najbardziej obciążonych pasach ruchu wybranych odcinków nawierzchni przedstawiono na rysunku 3. Nawierzchnie o ciągłym zbrojeniu wykazują najlepszą równość podłużną – najniższy wskaźnik IRI, około 1,1 mm/m. Największe nierówności stwierdzono na autostradzie o konstrukcji z podbudową z kruszywa (około 1,5–1,6 mm/m). Rodzaj konstrukcji wpływał istotnie na równość podłużną po 2–20 latach eksploatacji drogi, niezależnie od technologii wykończenia nawierzchni.

Wpływ układania betonu nawierzchniowego w deskowaniu ślizgowym

Układanie warstwy nawierzchniowej z betonu w deskowaniu ślizgowym jest faktycznie pewną odmianą procesu ekstruzji, znanego rodzaju obróbki plastycznej aluminium lub tworzyw sztucznych. Podczas ekstruzji materiał pod naciskiem stempla wypływa przez szczelinę utworzoną przez narzędzia i przyjmuje końcowy kształt. Ekstruzja betonu polega na wyciskaniu uplastycznionej mieszanki betonowej przez prostokątną szczelinę utworzoną przez cztery powierzchnie: powierzchnię podbudowy (od spodu), stalowe boki formy ślizgowej oraz stół dociskowy maszyny układającej (od góry), formujący powierzchnię



Rys. 3. Uśrednione wartości wskaźnika IRI wyznaczone na wybranych odcinkach nawierzchni betonowych w Polsce [8]



Rys. 4. Schematyczny przekrój poprzeczny układarki (strzałki wskazują powierzchnie tworzące prostokątną, przesuwającą formę, przez którą przeciskana jest mieszanka betonowa)

jezdni. Ilustrację tego procesu przedstawiono na rysunku 4 jako schematyczny przekrój poprzeczny układarki ze wskazaniem powierzchni tworzących przesuwającą „formę prostokątną”, przez którą przeciskana jest mieszanka betonowa. Mieszanka nie jest przeciskana przez „formę” za pomocą jakiegoś stempla, lecz to „forma” przesuwa się zagarniając mieszankę ułożoną na warstwie podbudowy z kontrolowanym nadmiarem. W wyniku energicznej vibracji mieszanka zostaje mocno uplastyczniona i staje się podatna na formowanie, a ułożona z nadmiarem warstwa zagęszcza się. Po przesunięciu stołu dociskowego powierzchnia ułożonej warstwy betonu jest jeszcze wygładzana za pomocą listwy poprzecznej i ewentualnie podłużnej (fot. 2). Listwa poruszająca się oscylacyjnie usuwa finalnie ewentualnie nierówności i powierzchnia warstwy uzyskuje już prawie końcową niweletę. Następujące później operacje pielęgnacji powierzchniowej oraz szrotkowania nawierzchni w celu odstonięcia ziaren kruszywa nie wpływają na ostateczną niweletę jezdni (por. fot. 1). Kolejno następujące operacje przecinania szczelin dylatacyjnych i ich wypełniania nie wpływają również w sposób widoczny na mierzoną równość nawierzchni. Niemniej jednak występowanie szczelin stanowi przerwanie ciągłości powierzchni i może być subiektywnie postrzegane przez kierowców jako nieznaczne zaburzenie równo-

ści. Szczeliny wykonane prawidłowo, dyblowane lub kotwione zgodnie z wymaganiami projektowymi, nie wykazują uskoków, a zatem w ich miejscach nie są rejestrowane istotne zaburzenia profilu geometrycznego nawierzchni.

Przeciskanie betonu przez opisaną „formę” ślizgową wymaga dużej sztywności ramy maszyny, dużej siły docisku stołu i należytego jej rozkładu, co pociąga za sobą wymaganie odpowiednio dużej masy maszyny i usytuowania jej środka ciężkości względem stołu dociskowego, a także adekwatnie dużej siły trakcyjnej, przesuwałcej maszynę na

gąsienicach w kierunku układania. Współczesne układarki do betonu, zgodnie z normą ISO [9], spełniają te wszystkie wymagania, oferując jednocześnie znaczną swobodę wyboru grubości i szerokości układanej warstwy betonu, jak również możliwość wyboru układania dwuwarstwowego z monolitycznym połączeniem między warstwami.

Prawidłowe ustawienie maszyny układającej beton w deskowaniu ślizgowym należy do kompetencji wykonawcy nawierzchni i podlega sprawdzeniu m.in. na odcinku próbnym wykonywanej nawierzchni. Niezależnie od regulacji maszyny, budowa nawierzchni o odpowiedniej równości oznacza dla wykonawcy konieczność zapewnienia odpowiednio dokładnego prowadzenia maszyny według należycie rozpiętych i podpartych drutów sterujących (1) oraz zapewnienie odpowiednio równej i nośnej trasy przejazdu gąsienic napędu układarki (2). Oba te miejsca wskazane są na schemacie na rysunku 4. Konwencjonalne prowadzenie wysokościowe układarki odbywa się za pomocą drutów sterujących, rozpiętych na podpórkach wzdłuż obu krawędzi układanej nawierzchni. Odstęp punktów podparcia nie powinien w zasadzie przekraczać 5 m, w przeciwnym razie równość nawierzchni może być gorsza. Dostępne są nowoczesne sposoby zdalnego sterowania wysokościowego maszyny za pomocą elektronicznych sensorów odległości dołączonych do globalnego systemu pozycjonowania GPS, ale ich wykorzystanie jest jak dotąd sporadyczne [10].

Właściwości materiałowe i technologiczne

Właściwości reologiczne betonu

Wybór składników i projektowanie składu mieszanki betonowej do wykonania nawierzchni drogowej przebiegają w taki sposób, aby zapewnić uzyskanie końcowych właściwości mechanicznych i trwałości betonu [11]. Ani wymagania normowe, ani informacje podręcznikowe nie wskazują jednoznacznie, jak dobierać składniki betonu z uwagi na projektowaną równość nawierzchni. Wiedza na ten temat stanowi o umiejętnościach wykonawcy i jest związana z konkretnymi maszynami i konkretnymi zestawami materiałów. Niemniej można podać kilka ogólnych wskazówek i propozycji.

Na fotografii 3 przedstawiono widok układarki betonu nawierzchniowego z boku i od spodu, aby pokazać przestrzeń,

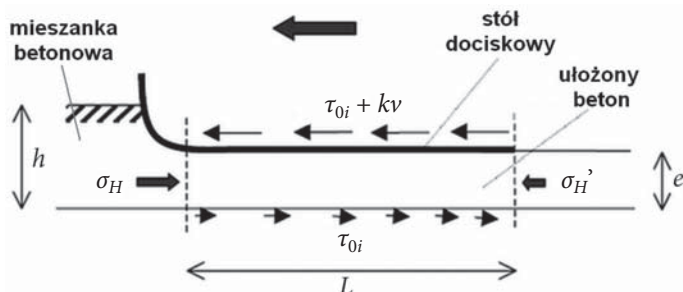


Fot. 2. Widok nawierzchni po przejściu układarki (widoczne stalowe boki formy ślizgowej, stół dociskowy oraz listwa wyrównująca)



Fot. 3. Widok czoła układarki z boku od spodu: zestaw wibratorów i czoło stołu dociskowego, na dole warstwa geowłókniny na podbudowie (fot. własna autora)

w której odbywa się kluczowy proces uplastycznienia mieszanki betonowej i ściskania upłynnionej mieszanki, aby ją odpowiednio zagęścić i uformować powierzchnię warstwy. Widoczny jest rząd ukośnie ustawionych wibratorów oraz czoło stołu dociskowego. Wielkość i kształt wibratorów są dostosowane do układania nawierzchni jednowarstwowej lub dolnej warstwy nawierzchni dwuwarstwowej. W tym drugim przypadku, do zagęszczania betonu w warstwie górnej o grubości na ogół około 5 cm stosuje się raczej wibratory o kształcie litery T. Na kolejnym rysunku (rys. 5) pokazano modelowy schemat oddziaływania układarki na mieszankę betonową, wykorzystywany do komputerowej symulacji układania w deskowaniu ślizgowym.



Rys. 5. Modelowy schemat oddziaływania układarki na mieszankę betonową wykorzystany do komputerowej symulacji układania w deskowaniu ślizgowym (na podstawie [12])

Kluczowe dla uzyskania równości wyciskanej warstwy betonu zachodzą właśnie w przestrzeni pokazanej na fotografii 3 i rysunku 5, tj. w otoczeniu wibratorów, przy czołe stołu dociskowego i dalej pod stołem. Stan naprężenia w przeważającej części obszaru uplastycznionej mieszanki betonowej jest trójosiowym nierównomiernym ściskaniem. Możliwe jest więc duże i równomierne zagęszczenie mieszanki betonowej. Kluczem do równości nawierzchni jest stałość nacisku mieszanki na początek stołu dociskowego; znaczne zmiany ciśnienia nie dają się skompensować ruchem stołu dociskowego i powstają fale. Zatem przed rzędem wibratorów należy utrzymywać jednakowej wysokości warstwę mieszanki i utrzymywać stałą prędkość przesuwu „formy”

czyli prędkość przejazdu układarki po podbudowie. Jednocześnie należy zabiegać, aby właściwości reologiczne mieszanki betonowej były jednakowe w sensie podatności na zagęszczanie wibracyjne i zachowania sztywności po zakończeniu wibracji.

Długość stołu dociskowego (ozn. L na rysunku 5) jest istotnym parametrem konstrukcji układarki, ponieważ po wysunięciu się spod stołu mieszanka powinna już utrzymywać niezmienny kształt powierzchni. Przy zbyt krótkim stole dociskowym zagęszczona mieszanka mogłaby wykazywać tendencję do rozprężania i tworzenia garbów po wysunięciu (podobny efekt mógłby wystąpić przy błędach wypoziomowa-

nia stołu). Do opisu zachowania się mieszanki betonowej pod stołem dociskowym stosuje się modele reologiczne jak dla cieczy, z określoną granicą naprężenia, przy którym następuje płynięcie. W przypadku modelu Bingham'a materiał charakteryzuje granica płynięcia τ_0 i lepkość plastyczna μ . Jednakże znajomość tych obu parametrów podczas mieszania nie wystarcza, w okresie między wymieszaniem składników a wbudowaniem mieszanki betonowej następuje ewolucja właściwości reologicznych, głównie z powodu występowania zjawiska tiksotropii. Dodatkowo, tuż po wymieszaniu wody ze stałymi składnikami betonu rozpoczynają się procesy hydrolizy i hydratacji ziaren cementu. Na granicy między mieszanką a stalowym stołem dociskowym powstaje warstwa poślizgowa o innej charakterystyce reologicznej, związanej z tzw. efektem ściany i lokalnej segregacji i ułożenia ziaren.

Przeprowadzona analiza numeryczna [12] wykazała, że ciśnienie wywierane na mieszankę pod stołem (por. rys. 5) głównie zależy od wysokości warstwy mieszanki przed maszyną h i lepkości plastycznej mieszanki μ :

$$\sigma_H = \rho g h + a + b \cdot \mu \quad (1)$$

σ_H – poziome naprężenie normalne,

ρ – gęstość mieszanki betonowej,

g – przyspieszenie ziemskie,

a, b – stałe parametry.

W celu uniknięcia powstawania fałd poza stołem dociskowym naprężenie ścinające w betonie w miejscu wysunięcia spod stołu powinno być mniejsze niż granica płynięcia mieszanki w spoczynku z uwzględnieniem tiksotropii czyli:

$$\sigma_H' < 2(\tau_0 + A_{mix} \cdot t) \quad (2)$$

σ_H' – poziome naprężenie normalne przy końcu stołu dociskowego,

t – czas przebywania mieszanki pod stołem, $t = L/v$, gdzie L oznacza długość stołu dociskowego, v – prędkość jazdy układarki.

Stosując oznaczenia przyjęte na rysunku 5 równanie równowagi w warstwie betonu pod stołem dociskowym zapisuje się następująco [12]:

$$(\sigma_H - \sigma_H') e < (2\tau_{0i} + k \cdot v) L \quad (3)$$

przy czym k oznacza współczynnik lepkości warstwy kontaktowej między stołem a mieszanką.

Na tej podstawie, minimalna długość stołu dociskowego niezbędna, aby uniknąć postawiania fałd nawierzchni wynosi:

$$L_{\min} = \frac{\rho g h + a + b \cdot \mu - 2\tau_0}{2 \left(\frac{\tau_{0i}}{e} + \frac{A_{thix}}{v} \right) \frac{k}{e} v} \quad (4)$$

Z równania równowagi można też wyznaczyć, jaka kombinacja stałych materiałowych charakteryzujących właściwości reologiczne mieszanki betonowej będzie spełniać warunek wykonania nawierzchni bez fałd przy danej prędkości jazdy układarki i danej długości stołu dociskowego. Niestety jednoznaczne przypisanie stałych materiałowych, takich jak τ_0 , μ , A_{thix} , τ_{0i} oraz k do konkretnego składu mieszanki betonowej jest niemożliwe. Praktyka wyprzedza teorię w tym zakresie i dlatego ocena przydatności mieszanki betonowej w procesie układania nawierzchni metodą ślizgową jest oparta na obserwacjach praktycznych i technicznych cechach mieszanki, takich jak:

- urabialność,
- zdolność do zamykania powierzchni (przy wygładzaniu),
- stabilność krawędzi po zagęszczeniu,
- jednorodność.

Omówienie tych cech i możliwości optymalizacji mieszanki na ich podstawie przedstawiono w dalszej części artykułu.

Urabialność i jednorodność betonu

W wymaganiach technicznych GDDKiA czy też analogicznych wymaganiach austriackich występują wymagania związane z urabialnością i jednorodnością mieszanki betonowej, bezpośrednio lub pośrednio wynikające z zamierzenia zapewnienia odpowiedniej równości nawierzchni. Oto wybrane fragmenty z RVS [13] w swobodnym tłumaczeniu:

Mieszanka betonowa musi zostać tak zaprojektowana i wbudowana, aby po przeciągnięciu szalunku ślizgowego osiągnąć wymaganą wytrzymałość krawędzi oraz powierzchni bocznych nie całkiem jeszcze związanego betonu. W szczególności należy zapewnić jednorodność, konsystencję oraz punkt piaskowy, który należy dopasować odpowiednio do wymagań.

Czas mieszania składników betonu należy tak dobrać, aby po wymieszaniu wszystkich składników możliwe było uzyskanie jednorodnego rozmieszczenia i wielkości porów w betonie.

Wybrane celowo fragmenty WWiORB [4], odnoszące się do mieszanki betonowej i technologii wbudowania, zestawiono w tabeli 3. Niewymienione w tabeli 3 są wymagania dotyczące stałości właściwości materiałowych, wydajności węzłów do produkcji mieszanki, tolerancji dozowania składników oraz poziomu kontroli składników i produkcji betonu. Zgodność materiałów i urządzeń do produkcji betonu z odpowiednimi normami, zwłaszcza z PN-EN 206 [14] i normami związanymi, jest wymaganiem składnikiem procedury kon-

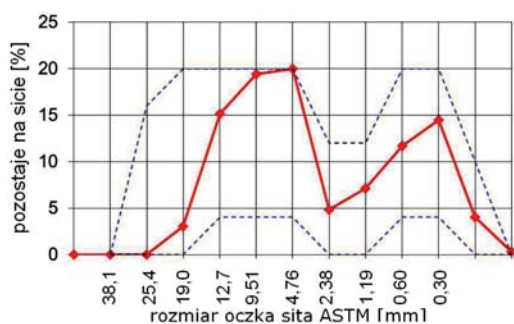
Tabela 3. Wymagania materiałowo-technologiczne GDDKiA [4] związane z uzyskaniem projektowanej równości nawierzchni betonowej (wybrane fragmenty)

<p>5.4.1.1. Konsystencja</p> <p>Konsystencja mieszanki betonowej powinna być dostosowana do warunków transportu, technologicznych warunków układania i zagęszczania. Ilość wody dodanej do mieszanki betonowej po uwzględnieniu danej wilgotności własnej kruszywa, czynników pogodowych oraz sposobu transportu należy ustalić w taki sposób, aby beton miał odpowiednią konsystencję, możliwa była jego obróbka, nie dochodziło do segregacji, a podczas zagęszczania powstawała jednorodna, szczelna struktura oraz została osiągnięta wymagana forma nawierzchni. Dopuszcza się konsystencję S1 ÷ S2 sprawdzaną metodą stożka opadowego wg PN-EN 12350-2, konsystencję V2 ÷ V4 sprawdzaną metodą Ve-Be wg PN-EN 12350-3, lub konsystencję C1-C2 sprawdzaną metodą stopnia zagęszczalności wg PN-EN 12350-4. Przy wbudowywaniu betonu w deskowaniu ślizgowym, należy przyjąć taką konsystencję betonu, aby świeżo ułożona i zagęszczona nawierzchnia (po przesunięciu deskowania) nie odkształcała się tzn. nie opadała krawędź boczna i boczne krawędzie płyt były gładkie.</p>
<p>5.5.4. Technologia produkcji mieszanki betonowej</p> <p>Czas mieszania w mieszalnikach o mieszanym wymuszonym powinien wynosić co najmniej 45 sekund i zapewnić jednorodność i stabilność urabialności mieszanki betonowej. Recepta powinna być korygowana na bieżąco o wartości wilgotności kruszyw. Producent betonu powinien zapewnić niezbędną obsługę laboratoryjną do weryfikacji wilgotności kruszyw minimum raz na dobę dla produkcji nieciągłej i minimum dwa razy na dobę dla produkcji ciągłej. Do wytwarzania betonu nie dopuszcza się cementu o temperaturze wyższej niż 80°C. Wytwórnia musi wyprodukować, a samochody muszą przewieźć na miejsce wbudowywania taką ilość mieszanki by maszyna układająca nawierzchnię mogła pracować bez zatrzymań na każdej dziennej działce. Każde zatrzymanie maszyny skutkuje powstaniem nierówności podłużnej.</p>
<p>5.5.7. Wbudowywanie mieszanki betonowej</p> <p>Proces wbudowywania i zagęszczania (łącznie z wytworzeniem i transportem) mieszanki powinien być zakończony przed rozpoczęciem wiązania zastosowanego cementu. Po upływie tego czasu, każdy samochód z ładunkiem mieszanki musi być usunięty z budowy. Ruch maszyny powinien być płynny, bez zatrzymań, co zabezpiecza przed powstawaniem nierówności. Zalecana prędkość przesuwu powinna być zgodna z danymi producenta maszyny oraz otrzymanymi z odcinka próbnego. Zespół wibratorów układarki powinien być wyregulowany w ten sposób, by zagęszczenie masy betonowej było równomierne na całej szerokości i grubości wbudowywanego betonu. Nie wolno dopuszczać do przewibrowania mieszanki betonowej. ... na bieżąco, po przesunięciu szalunku ślizgowego, muszą być zacierane i uzupełniane boczne powierzchnie nawierzchni po pojawiających się rakach, ubytkach, dziurach. W tym czasie też należy obserwować, czy nie opada krawędź boczna nawierzchni. W przypadku zaistnienia zjawiska opadania krawędzi, należy wstrzymać układanie nawierzchni, zebrać i wywieźć mieszankę rozładowaną w miejscu układania i zastąpić ją nową o właściwej konsystencji, przy której krawędź nie opada.</p>
<p>Warunki pogodowe i transport mieszanki</p> <p>Nawierzchnie betonowe powinny być wykonywane w temperaturze powietrza nie niższej niż +5°C i nie wyższej od +25°C (w ciągu całej doby). Dopuszcza się wykonywanie nawierzchni betonowej w temperaturze powyżej +25°C pod warunkiem, że temperatura mieszanki betonowej nie przekroczy +30°C. Czas transportu od wytwórni do miejsca jej wbudowania powinien być uzależniony od właściwości mieszanki betonowej i temperatury otoczenia. Liczba środków transportowych musi zapewnić ciągłą pracę zespołu układającego mieszankę betonową.</p>

troli jakości nawierzchni. Ważna jest też wymagana zgodność procedur kontrolnych z rozporządzeniami dotyczącymi weryfikacji stałości właściwości użytkowych wytwarzanego betonu (zgodnie z krajowym systemem 2+). Wszystkie te wymagania przyczyniają się do zapewnienia jakości przy budowie nawierzchni drogowej o projektowanej równości.

Nierównomierne wymieszanie składników betonu może wpłynąć na zróżnicowaną podatność mieszanki na formowanie ekstruzyjne. Podobnie negatywny efekt może wywołać znaczna zmienność konsystencji mieszanki spowodowana np. opóźnieniem dostawy mieszanki lub przyspieszonym wiązaniem cementu w podwyższonej temperaturze. Właściwe dostosowanie szybkości przesuwu układarki i częstotliwości wibracji do konsystencji mieszanki w określonych warunkach pogodowych należy do wymaganych umiejętności wykonawcy. Niedoskonałość w tym zakresie odbija się albo pofalowaniem powierzchni, albo nadmierną utratą napowietrzenia, albo brakiem zamknięcia powierzchniowego betonu. Doświadczenie wykonawcy w prowadzeniu układarki jest tu czynnikiem decydującym.

Korzystny wpływ na urabialność i jednorodność mieszanki ma stosowanie kruszyw o ziarnach kubicznych. Sformułowane w [4] wymagane ograniczenie wskaźnika kształtu kruszywa grubego SI_{15} lub płaskości FI_{15} w odniesieniu do górnej warstwy nawierzchni jest więc uzasadnione. Znany jest wpływ ciągłości krzywej uziarnienia na zagęszczalność mieszanki betonowej. Jednakże w przypadku technologii układania ślizgowego stwierdzono, że korzystne rezultaty uzyskuje się, gdy uziarnienie mieści się w obszarze wskazanym na rysunku 6 między liniami przerywanymi. Krzywa uziarnienia pokazana jest w sposób stosowany w USA, a obszar zalecanego uziarnienia określa się nazwą obszaru „tarantula” [1].



Rys. 6. Zakres zalecanego uziarnienia kruszywa do budowy nawierzchni metodą ślizgową („tarantula”) i przykładowa krzywa przesiewu

Z uwagi na równość nawierzchni, podczas jej budowy, należy unikać nadmiernie wysokich gradientów temperatury i dużych zmian wilgoci w betonie poprzez stosowanie dobrych praktyk pielęgnacji podczas dojrzewania. Właściwa pielęgnacja polega na zapobieganiu przedwczesnej utracie wilgoci oraz sterowaniu rozkładem temperatury w betonie (w razie nagłych zmian pogody). Kilka prac badawczych wykazało, że nadmierne gradienty temperatury lub wilgoci występujące w płycie nawierzchni we wczesnym wieku betonu (szczególnie w ciągu pierwszych 72 godzin) mogą spowodować znaczne zwijanie się płyt. W konsekwencji powoduje to występowanie naprężeń w płycie i tendencję do

pewnego unoszenia krawędzi, czemu przeciwstawia się zarówno grawitacja, jak też sztywne wkładki stalowe w szczelinach czyli dyble. Zjawiska nazywane angielskojęzycznymi terminami *curling* i *warping* oraz tzw. temperatura zerowego naprężenia są bliżej omówione w [1]. Nadmierne wysokie gradienty temperatury lub wilgotności mogą prowadzić do zmian profilu nawierzchni. Dlatego niekiedy zauważa się różnice profilu nawierzchni, jeżeli pomiary równości prowadzone są rano po zimnej nocy lub wieczorem po gorącym dniu. Aby ograniczyć deformacje płyt przy ich wysychaniu korzystnie jest przeprowadzić optymalizację składu betonu pod tym kątem. Do takiej optymalizacji wybiera się albo kryterium ograniczenia zawartości zaczynu do 25%, albo ograniczenia skurczu przy wysychaniu. Zalecanym kryterium jest skurcz swobodny $< 420 \mu\text{m}$ w wieku 28 dni, oznaczony zgodnie z ASTM C157, a w warunkach krajowych zgodnie z PN-EN 12390-16 [15].

Metody wspomagające zapewnienie jakości i optymalizację mieszanki betonowej

Skład i konsystencja mieszanki betonowej, a zwłaszcza jej jednorodność, mają istotne znaczenie przy formowaniu powierzchni jezdni z betonu. Jednakże standardowe miary konsystencji mieszanki betonowej nie odzwierciedlają podatności mieszanki na formowanie w deskowaniu ślizgowym. Na równość wykonanej nawierzchni wpływa również inna specyficzna cecha mieszanki betonowej, związana z jej usztywnieniem zaraz po zawibrowaniu, tj. skłonność do utrzymywania pionowych krawędzi po przejściu przez formę ślizgową. Niestandardowe metody badań mieszanki betonowej na nawierzchnie, służące do zapewnienia jakości procesu formowania powierzchni o wymaganej równości, zostały prototypowo wprowadzone w USA [16–17] i są to:

1. *Box test* – określanie stabilności krawędzi uformowanej warstwy i podatności mieszanki na wibracje. Metoda dedykowana do technologii ślizgowego układania nawierzchni. Lepiej niż metody tradycyjne charakteryzuje mieszankę, która musi być wystarczająco płynna, aby umożliwić prawidłowe umieszczenie i konsolidację, ale wystarczająco sztywna po zagęszczeniu, aby utrzymać stałość kształtu krawędzi. Badanie polega wypełnieniu formy sześcienniej o boku 305 mm do wysokości 241 mm i włożeniu wibratora na 6 sekund. Boki formy usuwa się natychmiast, a tak zagęszczony beton podlega ocenie pod kątem konsolidacji i opadania krawędzi (fot. 4a). Stosowany czas zagęszczania odpowiada okresowi oddziaływania pojedynczej buławy wibratora układarki na objętość jednostkową mieszanki między wibratorami. Mieszankę betonową można następnie modyfikować, aż do uzyskania obu pożądanych właściwości (tabela 4).
2. Badanie urabialności metodą VKelly pozwala również na ocenę podatności mieszanki na wibracje, dotyczy właściwości tiksotropowych mieszanki. Metoda oryginalnie opracowana do charakteryzowania mieszanek suchych – polega na obserwacji zagłębienia półkuli o masie 13,6 kg z przymocowaną buławą wibratora w głąb warstwy mieszanki betonowej (fot. 4b). Wskaźnik VKelly wyznacza

się na podstawie prędkości opadania kuli podczas pracy wibratora (tabela 4).

3. Badanie rozkładu wielkości porów w mieszance betonowej metodą sekwencyjno-ciśnieniową tzw. SAM przeprowadza się za pomocą zmodyfikowanego aparatu ciśnieniowego. Wykorzystując sekwencję zmian ciśnienia uzyskuje się informację o dystrybucji porów powietrznych w mieszance w ciągu około 15 minut. Liczba SAM jest skorelowana z jakością i stałością napowietżenia mieszanki [18] i może służyć do monitorowania zmian napowietżenia, jak również wskazywać konieczność korekty mieszanki betonowej. Możliwość skutecznego jej wykorzystania na budowie nawierzchni w Polsce została potwierdzona (fot. 5).

Tabela 4. Kryteria optymalizacji składu betonu przeznaczonego do układania nawierzchni w technologii ślizgowej

Metoda badania	Kryterium
VKelly	wskaźnik VKelly od 15 do 30 mm/√s
Box test	opad krawędzi < 6 mm zawartość porów na powierzchni < 30%
SAM	zawartość powietrza > 4% liczba SAM < 0,20



Fot. 5. Widok urządzenia Super Air Meter w użyciu na placu budowy drogi ekspresowej [18]



Fot. 4. Ilustracja sposobu oznaczania stabilności krawędzi uformowanej warstwy i podatności mieszanki betonowej na wibracje: a) metoda „box test”, b) metoda VKelly

Ponieważ charakterystyka twardnienia betonu w pierwszych 72 godzinach od zarobienia jest też ważna w kontekście równości nawierzchni, warto ją określić, aby rozpoznać podatność mieszanki o konkretnej recepturze na oddziaływanie pogodowe. Znanym narzędziem do przewidywania skutków oddziaływania pogody na świeżo ułożoną nawierzchnię z betonu jest oprogramowanie HIPERPAV [19] – pozwala na oszacowanie wpływu zmian składu betonu na powstawanie naprężenia w nawierzchni w okresie 3 dób od jej ułożenia. Analiza umożliwi optymalizację składu mieszanki betonowej.

Do bieżącego monitorowania równości podłużnej i poprzecznej na krótkich odcinkach nawierzchni, oprócz wspomnianej wcześniej kontroli ciągłej, przydatna jest dosyć nowa metoda pomiaru za pomocą urządzenia Dipstick. Zgodnie z AASHTO R041-05[20] urządzenie to mierzy profil nawierzchni (względne różnice wysokości) z szybkością i dokładnością większą niż tradycyjne badanie za pomocą łąty i klina. Dipstick jest lekkim urządzeniem przenośnym, jest przede wszystkim używany do pomiaru profilu podłużnego, z którego można obliczyć wskaźnik IRI; jest też przydatny do pomiaru profilu poprzecznego. Urządzenie ustawione na nawierzchni mierzy zmiany wysokości między dwiema nogami podpierającymi (rozstaw do 30 cm). Operator kroczy po jezdni podpierając się tym urządzeniem jakby laską, z tym że przy kolejnym kroku obraca urządzenie na jednej nodze (fot. 6). Urządzenie automatycznie rozpoznaje kroki i obrót oraz zapisuje w pamięci różnice wysokości. Po zmierzeniu profilu za pomocą algorytmów komputerowych dokonuje się filtracji określonych długości fal i oblicza się wskaźnik IRI. Profil wyznacza się wzdłuż wybranej linii, zatem dogodne jest wykonanie pomiarów wtedy, gdy są już wycięte szczeliny podłużne i poprzeczne.

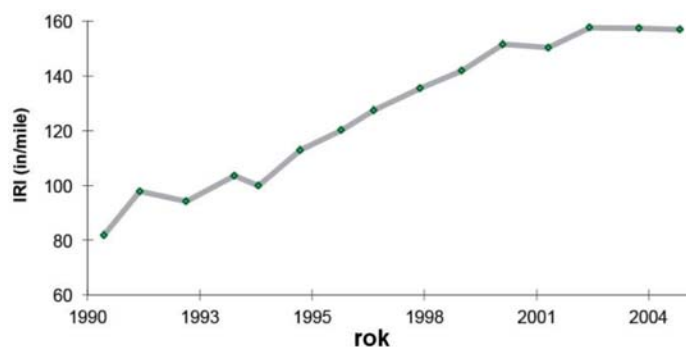
Zmiana równości nawierzchni w czasie eksploatacji

Zużycie nawierzchni z upływem czasu użytkowania ujawnia się w formie pewnej degradacji profilu i wskaźnik IRI zwiększa się. Długotrwała funkcjonalność nawierzchni jest



Fot. 6. Pomiar równości podłużnej nawierzchni za pomocą urządzenia Dipstick (laboratorium GDDKiA O/Białystok)

m.in. rezultatem początkowej równości i trwałości betonu w nawierzchni. Można wykazać związek między równością nawierzchni i kosztami przejazdów ponoszonymi przez użytkownika drogi, w tym kosztami paliwa, kosztami zużycia i remontu pojazdu, kosztami związanymi z prędkością przejazdu i bezpieczeństwa pasażerów, hałasem. Znane są wyniki badań, które różnicują wyraźnie długodystansowe koszty przejazdów ciężarówek po nawierzchniach sztywnych i nawierzchniach podatnych.



Rys. 7. Równość podłużna nawierzchni betonowej w okresie 15-letniej eksploatacji przykładowego odcinka autostrady amerykańskiej na podstawie [21] (przeliczenie jednostek: 80 in/mile = 1,26 mm/m)

Zmianę wskaźnika IRI w okresie 15-letniej eksploatacji przykładowego odcinka nawierzchni betonowej pokazano na rysunku 7. Na podstawie nachylenia wykresu wyznacza się przybliżoną roczną degradację równości nawierzchni, odzwierciedloną zwiększeniem wskaźnika IRI. Roczna zmiana IRI odniesiona do średniego dziennego obciążenia ruchem pojazdów ciężarowych pozwala porównywać trwałość nawierzchni o zróżnicowanej konstrukcji. Takie podejście przyjęli autorzy pracy [21], którzy analizowali ekonomiczne znaczenie równości nawierzchni. Badania porównawcze zużycia paliwa dotyczyły samochodów ciężarowych poruszających się po nawierzchniach betonowych i asfaltowych. Średnia roczna degradacja profilu podłużnego nawierzchni betonowych o zbrojeniu ciągłym okazała się 4–5 razy mniejsza niż w przypadku innych rodzajów nawierzchni betonowych i ponad 10 razy mniejsza niż w przypadku nawierzchni asfaltowych. Wykazano wyraźne zróżnicowanie zużycia paliwa – większe zużycie w przypadku nawierzchni o większych nierównościach. Oprócz znaczenia ekonomicznego równości podłużnej nawierzchni trzeba też zwrócić uwagę na zwiększone oddziaływanie na środowisko związane z większą energochłonnością przewozów.

Zgodnie z przewodnikiem do projektowania nawierzchni metodą analityczno-empiryczną MEPDG [22] przewidywana równość nawierzchni niezbrojonej, dyblowanej i kotwionej w trakcie eksploatacji jest funkcją początkowego profilu nawierzchni i zmian profilu podłużnego, wywołanych uszkodzeniami od ruchu pojazdów bądź osiadaniem podłoża. Graniczny dopuszczalny wskaźnik równości IRI odpowiada negatywnej ocenie komfortu jazdy przez użytkowników. Wskaźnik IRI jest uzależniony od powstawania uskoków na szczelinach oraz spękań płyt betonowych, a także od czynników klimatycznych i właściwości podłoża.

Model do predykcji IRI w czasie był kalibrowany na podstawie terenowych obserwacji w USA, prowadzonych w ramach programu LTPP w różnych regionach w rozmaitych warunkach klimatycznych. Wzór na przewidywany wskaźnik równości podłużnej IRI w [calach/mile] jest następujący:

$$IRI = IRI_1 + C_{J1} * CRK + C_{J2} * SPALL + C_{J3} * TFAULT + C_{J4} * SF \quad (5)$$

w którym:

IRI_1 – początkowy wskaźnik równości podłużnej w [calach/mile],

CRK – udział procentowy płyt z pęknięciami poprzecznymi,

$SPALL$ – udział procentowy szczelin poprzecznych z odpryskami (o średnim i wysokim nasileniu),

$TFAULT$ – sumaryczny uskok na szczelinach poprzecznych na odcinku 1 mili, wyrażony w calach,

współczynniki $C_{J1} = 0,8203$; $C_{J2} = 0,4417$; $C_{J3} = 1,4929$; $C_{J4} = 25,24$,

SF – współczynnik miejscowy wg poniższego wzoru:

$$SF = AGE (1 + 0,5556 * FI) (1 + P_{200}) * 10^{-6} \quad (6)$$

w którym:

AGE – wiek nawierzchni w latach,

FI – wskaźnik zamrażania wyrażony w jednostkach [$^{\circ}F \cdot dni$],

P_{200} – udział procentowy ziaren w podłożu, przechodzących przez sito # 200 (75 μm).

Procentowy udział płyt z pęknięciami poprzecznymi oraz sumaryczny uskok na szczelinach poprzecznych wyznacza się według wzorów podanych w [22]. Przewidywany procentowy udział szczelin poprzecznych z odpryskami $SPALL$ wyznacza się według wzoru:

$$SPALL = \left(\frac{AGE}{AGE + 0,01} \right) \cdot \left(\frac{100}{1 + 1,005^{(-12 AGE + SCF)}} \right) \quad (7)$$

w którym:

SCF – współczynnik miejscowy, uzależniony od lokalizacji, rodzaju konstrukcji i rodzaju klimatu:

$$SCF = -1400 + 350 \cdot AC_{PCC} \cdot (0,5 + PREFORM) + 43,4 f'_c{}^{0,4} - 0,2 (FT_{cycle} \cdot AGE) + 43 H_{PCC} - 536 WC_{PCC} \quad (8)$$

AC_{PCC} – zawartość powietrza w betonie, %,

$PREFORM$ – liczba wskazująca na obecność wypełnienia szczeliny profilem gumowym; = 1 w przypadku jego obecności, = 0 – w przypadku jego nieobecności,

f'_c – wytrzymałość na ściskanie betonu [psi],

FT_{cycle} – średnia roczna liczba cykli zamrażania-rozmrażania,

H_{PCC} – grubość nawierzchni z betonu cementowego [cal],

WC_{PCC} – współczynnik woda-cement w betonie.

Jak pokazano powyżej, przewidywane zmiany profilu podłużnego w okresie eksploatacji nawierzchni w środowisku agresji mrozu i środków odladzających są uzależnione od tych właściwości betonu, które decydują o jego trwałości.

Projektowanie i wykonanie betonu trwałego jest opanowane [23], więc przewiduje się niewielkie zmiany równości nawierzchni w czasie eksploatacji. Świadczą o tym również wyniki pomiarów pokazane na rysunku 7.

Warto wspomnieć o innych elementach niezmienności profilu nawierzchni. Odpowiednio zaprojektowane dyble stalowe i wbudowane w miejscach szczelin poprzecznych zapobiegają powstawaniu uskoków na szczelinach, toteż pozytywnie wpływają na równość podłużną nawierzchni w okresie jej eksploatacji. Kotwy stalowe, łączące sąsiednie płyty, zapobiegają nadmiernemu rozwarciu szczelin podłużnych i w ten sposób przyczyniają się do utrzymania równości poprzecznej w czasie eksploatacji nawierzchni. Właściwe umieszczenie dybli w nawierzchni zapobiega powstawaniu przedwczesnych spękań i wykruszeń betonu przy szczelinach, a w konsekwencji przyczynia się do niezmienności profilu nawierzchni. Znaczący wpływ na długotrwałą równość nawierzchni ma też stabilność właściwości mechanicznych podbudowy i odporność na wyplukiwanie drobnych cząstek w okolicach szczelin dylatacyjnych. Oczywista jest rola stateczności nasypów i odpowiedniej nośności podłoża, podobnie w przypadku innych technologii budowy nawierzchni. Na trwałość nawierzchni wpływa również jakość systemu odwodnienia, w tym odpowiednio wykonane spadki i warstwy drenażowe. Przedwczesne uszkodzenia, takie jak uskoki szczelin lub ułamania naroży płyt mogą wskazywać na niedostatki systemu odwadniającego nawierzchni.

Podsumowanie

Budowa nawierzchni betonowych metodą ślizgową jest specyficznym procesem ekstruzji betonu, pozwalającym na monolityczne ułożenie warstwy przy jednym przejeździe układarki. Projektowanie mieszanki pod kątem równości nawierzchni dotyczy przede wszystkim dostosowania właściwości reologicznych mieszanki do parametrów pracy układarki. Urabialność, stabilność krawędzi i jednorodność mieszanki betonowej mają decydujące znaczenie przy formowaniu powierzchni z betonu. Istotne jest stosowanie kruszywa nienasiąkliwego o ziarnach kubicznych i układu cement+domieszki o właściwym czasie wiązania i kinematyce wczesnego twardnienia. Do optymalizacji składu betonu proponuje się wykorzystanie nowych metod charakteryzowania mieszanki pod kątem stabilności krawędzi, zamykania powierzchni i stałości napowietrzenia. Utrzymanie stałego profilu nawierzchni w projektowanym 30-letnim okresie eksploatacji jest możliwe dzięki wysokiej odporności betonu na silne oddziaływania mechaniczne, termiczne i agresję środowiska. Aktualny stan wiedzy i techniki pozwala na budowę nawierzchni betonowych zgodnych z podniesionymi wymaganiami równości, bez pogorszenia szybkości odprowadzania wody spod opon lub pogorszenia ich przyczepności.

Bibliografia

- [1] Glinicki M.A., *Inżynieria betonowych nawierzchni drogowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019

- [2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 1 sierpnia 2019 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. z 2019 poz.1643)
- [3] PN-EN 13036-5:2020 Cechy powierzchniowe nawierzchni drogowych i lotniskowych. Metody badań. Część 5: Określenie wskaźników nierówności podłużnej
- [4] Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych D-05.03.04 v02 Nawierzchnia z betonu cementowego (dokument wzorcowy), GDDKiA Warszawa, 30 września 2019; https://www.gddkia.gov.pl/frontend/web/userfiles/articles/d/dokumenty-techniczne_8162/WWiORB/punkt%205/D-05.03.04_NAWIERZCHNIA%20Z%20BETONU%20CEMENTOWEGO_V02.pdf
- [5] Merritt D.K., Chang G.K., Rutledge J.L., Best Practices for Achieving and Measuring Pavement Smoothness, A Synthesis of State-of-Practice, FHWA/LA.14/550, Louisiana Transportation Research Center, Baton Rouge 2015
- [6] ProVAL, www.RoadProfile.com (dostęp 15.04.2020)
- [7] Ruiz J.M., Miron A., Chang G., Rasmussen R.O., Xu Q., Use of slab curvature and ProVAL to identify the cause of premature distresses, Transportation Research Record, nr 2068, 2008, s.87-96
- [8] Mackiewicz P., Szydło A., Krawczyk B., *Wpływ technologii wykonania nawierzchni betonowych na teksturę i równość*, "Roads and Bridges – Drogi i Mosty", 17, 2, 2018, s.111-126; doi: 10.7409/rabdim.018.07
- [9] ISO 16039: 2004 Road construction and maintenance equipment – Slipform pavers – Definitions and commercial specifications
- [10] Jofré C. i in., Achieving and maintaining the evenness of concrete pavements, European Concrete Paving Association, Brussels 2017
- [11] Glinicki M.A., *Właściwości betonu nawierzchniowego z kruszywem odkrytym – wpływ rodzaju cementu i pielęgnacji*, „Drogownictwo”, LXXIV, nr 4, 2019, s.99-104
- [12] de Larrard F., Roussel N., Flow Simulation of fresh concrete under a slipform machine, Road Materials and Pavement Design, 12:3, 2011, s.547-566
- [13] RVS 08.17.02 Technische Vertragsbedingungen Betondecken: Deckenherstellung, Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien 2007
- [14] PN-EN 206:2016 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [15] PN-EN 12390-16:2020 Badania betonu – Część 16: Oznaczanie skurczu betonu
- [16] AASHTO PP 84-17 Standard Practice for Developing Performance Engineered Concrete Pavement Mixtures
- [17] Grove J., Praul M., Gudimettla J., Taylor P., Capon P., Keys to a Quality Culture, Proceedings – 11th International Conference on Concrete Pavements, San Antonio, Texas – Aug 28-Sept 1, 2016
- [18] Dąbrowski M., Glinicki M.A., Dziedzic K., Antolik A., Validation of sequential pressure method for evaluation of the content of microvoids in air entrained concrete, Construction and Building Materials, 227, 2019, 116633-1-12
- [19] HIPERPAV High Performance Paving Software, Version 3.20.0006, The Transtec Group and the Federal Highway Administration, 2010; <http://www.hiperpav.com/>
- [20] AASHTO R041-05 (2015) Standard Practice for Measuring Pavement Profile Using a Dipstick
- [21] Greene S., Akbarian M., Ulm F.-J., Gregory J., Pavement roughness and fuel consumption, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge 2013
- [22] Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice, 3rd Edition, AASHTO, 2020
- [23] Glinicki M.A., Dąbrowski M., Skrzypczyński M., *Wpływ pielęgnacji na właściwości napowietrzonego betonu w górnej warstwie nawierzchni z kruszywem odkrytym – badania modelowe*, „Cement Wapno Beton”, 84, 4, 2017, s. 271-281