



DAWID RYS

Politechnika Gdańska  
dawid.rys@wilis.pg.gda.pl



JÓZEF JUDYCKI



PIOTR JASKUŁA

Politechnika Gdańska  
piotr.jaskula@wilis.pg.gda.pl

## Wpływ równości nawierzchni podatnych na ich trwałość

Równość nawierzchni bezpośrednio wiąże się z dynamiką ruchu pojazdów. Nierówności nawierzchni powodują odchylenia nacisków osi pojazdów będących w ruchu od nacisku statycznego. Dynamiczne obciążenia pojazdów w większym stopniu mają wpływ na postęp degradacji konstrukcji nawierzchni drogowej, obiektów inżynierskich oraz innych elementów infrastruktury drogowej. Wyniki pomiarów dynamicznych nacisków osi podane są m.in. w publikacjach [1], [2], [5]. Przykładowy rozkład prawdopodobieństwa nacisków osi zmierzonych podczas ruchu pojazdu przedstawiono na rysunku 1. Zgodnie z badaniami przeprowadzonymi przez Gillespie i wsp. [5] wartość oczekiwana rozkładu prawdopodobieństwa przeważnie pokrywa się z naciskiem statycznym osi. Wskaźnik obciążenia dynamicznego DLC (ang. *Dynamic Load Coefficient*)

oznacza wskaźnik zmienności dynamicznych nacisków osi i jest miarą charakteryzującą rozkład prawdopodobieństwa dynamicznych nacisków osi, opisany wzorem:

$$DLC = \frac{\sigma}{\bar{F}} \quad (1)$$

w którym:

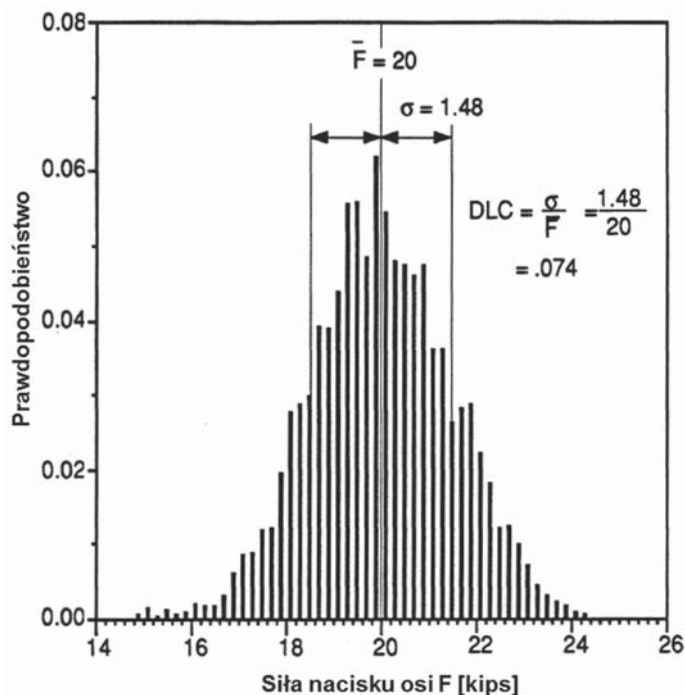
$\sigma$  – odchylenie standardowe siły nacisku osi,  
 $\bar{F}$  – średnia wartość siły nacisku osi w przybliżeniu równa naciskowi statycznemu.

W literaturze występuje również inna miara wyrażająca dynamiczne obciążenia osi: wskaźnik wpływu dynamicznego (ang. *Dynamic Impact Factor*) DI [2], [5], [7], który opisany jest wzorem:

$$DI = 1 + Z_r \cdot DLC \quad (2)$$

w którym:

$Z_r$  – kwantyl rozkładu normalnego,  
DLC – wskaźnik zmienności dynamicznych nacisków osi.



Rys. 1. Przykładowy rozkład prawdopodobieństwa nacisku osi pojedynczej (zawieszenie klasyczne, prędkość pojazdu 90 km/h, przecięt- na równość nawierzchni) [5]

Wraz ze wzrostem wskaźników DLC i DI rosną maksymalne dynamiczne obciążenia przekazywane przez pojazd na nawierzchnie. Na wartość współczynników DLC i DI wpływ mają charakterystyka zawieszenia, prędkość pojazdu i równość nawierzchni.

W badaniach Gillespie i wsp. [5] przeprowadzono m.in. analizę wpływu rodzaju zawieszenia na trwałość nawierzchni podatnych, z której wynika, że pojazdy wyposażone w zawieszenie klasyczne (z resorami piórowymi) wywołują większą szkodę zmęczeniową nawierzchni wyrażoną spękaniami zmęczeniowymi niż pojazdy wyposażone w zawieszenie pneumatyczne. W przypadku deformacji trwałych wpływ rodzaju zawieszenia i obciążeń dynamicznych z nim związanych jest pomijalnie mały. Wpływ rodzaju zawieszenia był również przedmiotem analiz prowadzonych w ramach projektu DIVINE [4], zgodnie z którymi nawierzchnie obciążone ruchem pojazdów wyposażonych w zawieszenia klasyczne ulegają uszkodzeniom w czasie o 15% krótszym niż nawierzchnie obciążone pojazdami z zawieszeniem pneumatycznym.

Sweatman [12] badał wpływ równości nawierzchni i prędkości pojazdów na współczynnik DLC przy różnych systemach zawieszenia pojazdów. Z badań tych wynika, że współczynnik DLC rośnie wraz ze wzrostem prędkości, co jest również potwierdzone badaniami Gillespie i wsp. [5]. Jak wynika z studiów literatury [1], [2], [5], [7], [11], [12], wraz z pogorszeniem równości (zwiększeniem wartości wskaźnika IRI) rosną wskaźniki DLC i DI, czyli rosną dynamiczne obciążenia wywierane przez osie pojazdów na nawierzchnie.

Stan i parametry zawieszenia pojazdów, mimo że znacząco wpływają na oddziaływania dynamiczne, są praktycznie niemożliwe do kontrolowania na drodze. Ograniczenie prędkości pojazdów ze względu na oddziaływania dynamiczne nie przyniesie rezultatu, ponieważ przy mniejszych prędkościach ruchu maleją moduły sztywności warstw asfaltowych i nawierzchnia jest bardziej wyętzana. Jedy- nym parametrem, który ma istotny wpływ na oddziaływa- nia dynamiczne pojazdów, a który może być kontrolowany i ulepszany, jest równość nawierzchni. Prawidłowa równość nawierzchni nowych jest uzyskiwana dzięki staranności wykonania robót. Równość jest tym elementem, który nie zwiększa kosztów realizacji inwestycji drogowej, a który może istotnie zwiększyć trwałość konstrukcji nawierzchni lub zmniejszyć ryzyko powstania przedwczesnych uszkodzeń poprzez zmniejszenie oddziaływań dynamicznych pojazdów.

Celem artykułu jest ocena, w jaki sposób oddziaływania dynamiczne pojazdów ciężkich wynikające z równości nawierzchni, mierzonej wskaźnikiem IRI, wpływają na trwałość zmęczeniową nawierzchni.

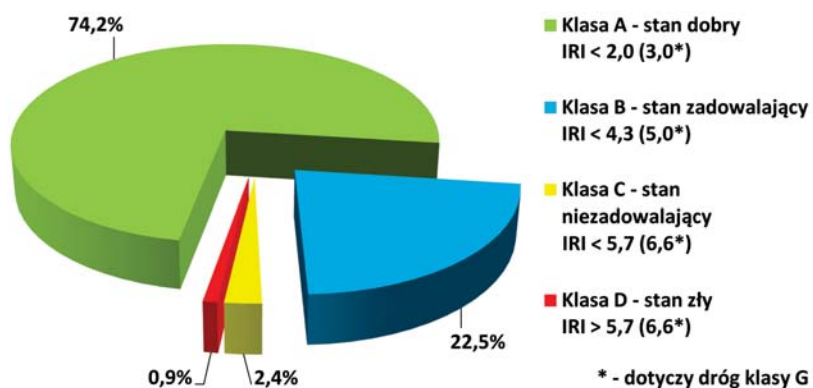
## Wpływ równości nawierzchni i prędkości pojazdów na dynamiczne oddziaływanie pojazdów

### Stan równości dróg w Polsce

Równość podłużna nawierzchni wyrażona jest za pomocą wskaźnika IRI (ang. *International Roughness Index*). W wytycznych stosowania systemu Diagnostyki Stanu Nawierzchni (DSN) [3] określono wymagania co do miarodajnej równości nawierzchni i podano je na rysunku 2.

Aktualne wyniki oceny stanu technicznego nawierzchni (2016 rok), dotyczące równości podłużnej wskazują, że na drogach krajowych ponad 74% długości odcinków jest w stanie dobrym (klasa A) a 22,5% w stanie zadowalającym. Mniej niż 4% odcinków jest w stanie niezadowalającym bądź złym (klasa C i D) [8]. Stan równości dróg krajowych w Polsce przedstawiono na rysunku 2. Od kilku lat równość

Rys. 2. Stan równości nawierzchni na drogach krajowych w Polsce w 2016 r. [8]



nawierzchni na drogach krajowych ulega poprawie, dzięki wielu remontom i nowym inwestycjom. Jest rzeczą pewną, że stan równości dróg wojewódzkich, powiatowych i gminnych jest gorszy niż dróg krajowych, brakuje jednak danych z pomiarów równości nawierzchni na tych drogach.

Nowe nawierzchnie na pasach ruchu zgodnie z rozporządzeniem Ministra Infrastruktury i Budownictwa [9] powinny wykazywać średni wskaźnik IRI na poziomie:

- $IRI_{\text{śr}} = 1,3$  w przypadku dróg klasy A,S i GP,
- $IRI_{\text{śr}} = 1,7$  w przypadku dróg klasy G.

W przypadku dróg klasy niższej niż G nie ustalono wymagań co do wskaźnika IRI. Zgodnie z [9] do oceny równości podłużnej warstwy ścieralnej nawierzchni dróg klasy Z, L, D oraz placów i parkingów należy stosować metodę pomiaru ciągłego równoważną użyciu łąty i klina z wykorzystaniem planografu, umożliwiającego wyznaczenie odchyłań równości podłużnej jako największej odległości (prześwitu) pomiędzy teoretyczną linią łączącą spody kółek jezdnych urządzenia a mierzoną powierzchnią warstwy – wynik podaje się w milimetrach. Warto dodać, że rozporządzenie dopuszcza, aby maksymalna zarejestrowana wartość IRI wynosiła:

- $IRI_{\text{max}} = 2,4$  w przypadku dróg klasy A,S i GP,
- $IRI_{\text{max}} = 3,4$  w przypadku dróg klasy G.

Oznacza to, że lokalnie na nowych drogach dopuszcza się miejsca o znacznym pogorszeniu równości względem reszty odcinka. W miejscach tych oddziaływania dynamiczne pojazdów będą wyższe i skutkować będą szybszą degradacją nawierzchni, co zostanie wykazane w dalszej części artykułu.

### Prędkość samochodów ciężarowych

Prędkość pojazdów, podobnie jak równość nawierzchni, istotnie wpływa na oddziaływania dynamiczne oraz na wskaźniki DI i DLC. Dopuszczalna prędkość samochodów ciężarowych w Polsce poza obszarem zabudowania wynosi od 70 km/h na drogach jednojezdniowych dwupasowych do 80 km/h na drogach dwujezdniowych, drogach ekspresowych i autostradach. Na podstawie ciągłych pomiarów prędkości w ruchu pojazdów można przyjąć, że na autostradach i drogach ekspresowych średnia prędkość pojazdów ciężkich wynosi 90 km/h, natomiast na pozostałych drogach 70 km/h [6].

## Współczynnik dynamiczny oddziaływania osi pojazdów

W analizach prezentowanych w niniejszym artykule zastosowano amerykańskie modele dynamicznego obciążenia nawierzchni pojazdami ciężkimi wyznaczone w raporcie [7]. Współczynnik DI w zależności od prędkości pojazdu i równości nawierzchni został opisany w pracy [7] następującym modelem:

$$DI = 1 + \alpha \cdot V \cdot IRI \quad (3)$$

w którym:

$\alpha = 0,0017$  – parametr dotyczy przyjętego w analizie modelu „quatercar”,

$V$  – średnia prędkość pojazdów [km/h],

$IRI$  – wskaźnik równości nawierzchni [mm/m].

Wartości wskaźnika wpływu dynamicznego DI przeliczono na wskaźniki zmienności dynamicznych nacisków osi DLC, przekształcając zależność 2:

$$DLC = \frac{DI - 1}{Z_r} = \frac{\sigma}{Q_{stat}} \quad (4)$$

w której:

$DI$  – wskaźnik wpływu dynamicznego, wg modelu (3),

$Z_r$  – kwantyl rozkładu normalnego,  $Z_r = 2$  zgodnie z [7],

$Q_{stat}$  – siła nacisku statycznego osi w przybliżeniu równa średniej z nacisków dynamicznych,

$\sigma$  – odchylenie standardowe dynamicznych nacisków osi.

Rozkład dynamicznych nacisków osi zdefiniowany jest poprzez obciążenie statyczne  $Q_{stat}$  oraz jeden ze wskaźników: DI lub DLC. Siły nacisku dynamicznego przeliczono na współczynnik równoważności obciążenia osi, które wyrażają oddziaływanie pojazdu na konstrukcję nawierzchni. Do obliczenia współczynników równoważności zastosowano wzór czwartej potęgi. Średni współczynnik równoważności obciążenia dynamicznego osi obliczono w sposób dyskretny na podstawie funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładu normalnego obciążeń dynamicznych osi, zgodnie ze wzorem (5):

$$F_{dyn} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{dyn_i}}{Q_s} \right)^4 p_i \quad (5)$$

w którym:

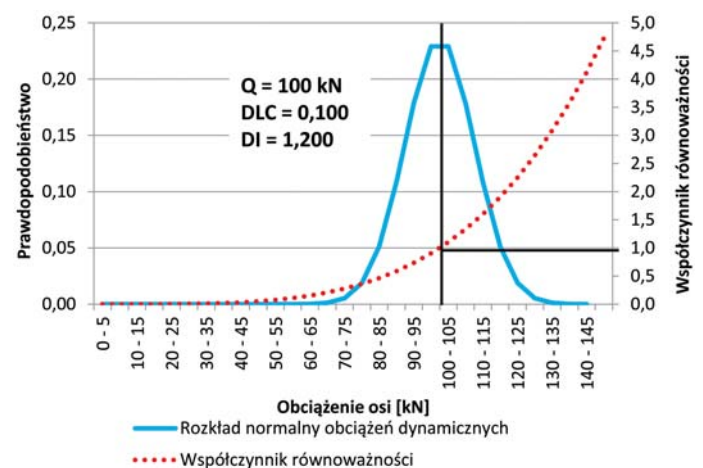
$F_{dyn}$  – współczynnik równoważności obciążenia pojazdu z uwzględnieniem oddziaływań dynamicznych,

$Q_{dyn_i}$  – obciążenie dynamiczne osi  $i$ , występujące z określonym prawdopodobieństwem  $p_i$ , przy czym sumowanie przeprowadza się do określonego poziomu istotności  $\alpha$  ( $p < \alpha$ ),

$Q_s$  – obciążenie standardowe osi  $Q_s = 100$  kN,

$n$  – liczba przyjętych przedziałów obciążenia dynamicznego w obrębie określonego poziomu istotności  $\alpha$ .

Schemat obliczenia średniego współczynnika równoważności obciążenia dynamicznego osi przedstawiono na rysunku 3. Jako przykład posłużono się osią o obciążeniu standardowym równym 100 kN. Obciążenie 100 kN odpowiada naciskowi statycznemu. Gdy pojazd znajduje się w ruchu, naciski dynamiczne zmieniają się na skutek nierówności nawierzchni, co oznaczono niebieską ciągłą linią na rysunku 3. Na rozpatrywanym przykładzie przyjęto, że wskaźnik obciążenia dynamicznego  $DLC = 0,1$ , natomiast wskaźnik wpływu dynamicznego  $DI = 1,2$ . Maksymalny dynamiczny nacisk osi wynosi 120 kN, minimalny zaś 80 kN (przy poziomie prawdopodobieństwa  $p = 96\%$ ). Zmienne naciski dynamiczne osi pojazdów w różnym stopniu oddziałują na nawierzchnię, przy czym oddziaływanie to wyraża się funkcją współczynnika równoważności obciążenia osi, która na rysunku 3 została oznaczona czerwoną przerywaną linią. Przyjmuje się, że w przypadku nawierzchni podatnych funkcja ta odpowiada wzorowi czwartej potęgi. Przemnożenie funkcji rozkładu prawdopodobieństwa nacisków dynamicznych przez funkcję współczynnika równoważności obciążenia osi daje wynik w postaci średniego współczynnika równoważności obciążenia dynamicznego osi. W rozpatrywanym przypadku współczynnik ten wynosi 1,06, podczas gdy współczynnik równoważności osi bez uwzględnienia efektów dynamicznych wynosi 1,00. Po podzieleniu średniego współczynnika równoważności obciążeń dynamicznych przez współczynnik równoważności w przypadku obciążenia statycznego otrzymamy współczynnik dynamicznego oddziaływania osi na nawierzchnię  $k_d$ . W przekształceniu (6) pokazano, że współczynnik  $k_d$  nie zależy od wartości obciążenia statycznego osi i może być stosowany w przypadku dowolnych obciążeń osi pojazdów.



Rys. 3. Schemat wyznaczenia średniego współczynnika równoważności obciążenia dynamicznego osi

Przekształcenie wzoru na współczynnik równoważności obciążenia pojazdu z uwzględnieniem oddziaływań dynamicznych:

$$\begin{aligned}
 F_{dyn} &= \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{dyn_i}}{Q_s} \right)^4 p_i = \\
 &= \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{stat} + \mu_i \cdot DLC \cdot Q_{stat}}{Q_s} \right)^4 p_i = \\
 &= \left( \frac{Q_{stat}}{Q_s} \right)^4 \cdot \sum_{i=1}^n (1 + \mu_i \cdot DLC)^4 p_i = k_d \left( \frac{Q_{stat}}{Q_s} \right)^4
 \end{aligned} \quad (6)$$

w którym:

$\mu_i$  – kwantyl rozkładu normalnego dotyczący określonego prawdopodobieństwa  $p_i$ , który może przyjmować wartości dodatnie i ujemne, przy czym ( $p < \alpha$ ), gdzie  $\alpha$  oznacza przyjęty poziom istotności (przyjęto  $\alpha = 96\%$ ),

$k_d$  – współczynnik dynamicznego oddziaływania osi na nawierzchnię, pozostałe oznaczenia zgodnie z opisami podanymi przy uprzednio zamieszczonych wzorach.

Należy zaznaczyć, że współczynnik  $k_d$  w równaniu (6) nie zależy od obciążenia danej osi, ale od współczynnika dynamicznego obciążenia DLC oraz od przyjętego poziomu prawdopodobieństwa  $\alpha$ .

## Analiza wpływu równości nawierzchni i prędkości pojazdu na trwałość nawierzchni

Na podstawie równania (6) i równania (3) określono zależność między wskaźnikiem IRI a współczynnikiem oddziaływania dynamicznego pojazdów  $k_d$  w przypadku czterech prędkości średnich pojazdów ciężkich. Wynik przedstawiono na rys. 4A.

Do określenia wpływu dynamicznego oddziaływania pojazdów na skrócenie trwałości zmęczeniowej nawierzchni zastosowano współczynnik DFL (ang. *Decrease of Fatigue Life*), który został wyprowadzony w publikacji [9], a na potrzeby niniejszego artykułu został przekształcony w następujący sposób:

$$\begin{aligned}
 DFL (\%) &= \left( 1 - \frac{F_{dyn,IRIp}}{F_{dyn,IRI}} \right) = \left( 1 - \frac{k_{d,IRIp} \cdot F_{stat}}{k_{d,IRI} \cdot F_{stat}} \right) = \\
 &= \left( 1 - \frac{k_{d,IRIp}}{k_{d,IRI}} \right)
 \end{aligned} \quad (7)$$

w którym:

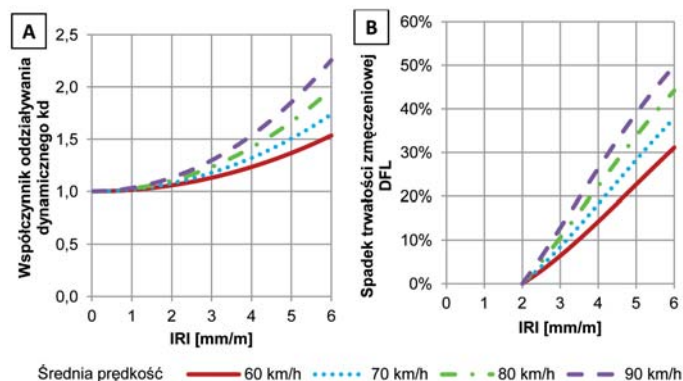
$F_{dyn,IRIp}$ ,  $F_{dyn,IRI}$  – dynamiczny współczynnik równoważności obciążenia osi przy równości nawierzchni odpowiednio IRIp i IRI,

$F_{stat}$  – statyczny współczynnik równoważności obciążenia osi,

$k_{d,IRIp}$ ,  $k_{d,IRI}$  – współczynniki oddziaływania dynamicznego dotyczące równości nawierzchni odpowiednio IRIp i IRI, IRIp – porównawcza wartość wskaźnika równości nawierzchni (przyjęto IRIp = 2,0),

IRI – średnia wartość wskaźnika równości nawierzchni.

Współczynnik DFL określa o ile procent zmniejszy się trwałość zmęczeniowa nawierzchni względem nawierzchni o dobrej równości, jeżeli równość nawierzchni pogorszy się. Poziomą równość porównawczą IRIp = 2,0 [mm/m] przyjęto jako granicę klasy równości A (bardzo dobrej) dotyczącej autostrad. Jeżeli przyjęto by inny poziom porównawczy, np. IRIp = 1,0 [mm/m] to wskaźnik DFL wzrósłby o kilka procent. Zależność wskaźnika DFL od współczynnika IRI przedstawiono na rysunku 4B.



Rys. 4. Wpływ równości i prędkości pojazdów na: A) współczynnik dynamicznego oddziaływania  $k_d$ , B) spadek trwałości nawierzchni

W przypadku równych nawierzchni ( $IRI \leq 1$  mm/m) współczynnik dynamiczny  $k_d$  bliski jest jedności i wraz z pogorszeniem równości (przyrostem IRI) współczynnik dynamiczny  $k_d$  znacznie się zwiększa (rys. 4A). Oznacza to, że w przypadku równych nawierzchni wpływ oddziaływania pojazdu z uwzględnieniem efektów dynamicznych jest taki, jak z uwzględnieniem wyłącznie obciążeń statycznych. Wraz z pogarszaniem się równości, nawierzchnia jest bardziej wyętzana na skutek dynamicznych obciążeń od poruszających się pojazdów. Warto zaznaczyć, że równość nawierzchni w trakcie eksploatacji z reguły ulega pogorszeniu i zwiększają się oddziaływania dynamiczne pojazdów, co dodatkowo przyspiesza wyczerpanie trwałości nawierzchni.

Wymagana równość oceniana (określana) wskaźnikiem IRI w przypadku nowych dróg wynosi poniżej 1,3 mm/m na drogach klasy A, S, GP, a 1,7 mm/m na drogach klasy G. Wymagania dotyczące dróg niższych klas nie zostały określone w odniesieniu do wskaźnika IRI. Do oceny równości podłużnej: m.in. warstwy ściernalnej nawierzchni dróg klasy Z, L, D oraz placów i parkingów należy stosować metodę pomiaru ciągłego równoważną użyciu łąty i klina z wykorzystaniem planografu, umożliwiającego wyznaczanie odchyłek równości podłużnej jako największej odległości (prześwitu) pomiędzy teoretyczną linią łączącą spody kółek jezdnych urządzenia a mierzoną powierzchnią warstwy (pomiaru dokonuje się w milimetrach). W praktyce maksymalną równość uzyskuje się na poziomie  $IRI \approx 1,0$ . Zmiana równości w obrębie dopuszczalnych granic klasy równości A, czyli z  $IRI = 1,0$  do  $IRI = 2,0$  [mm/m] w przypadku dróg klasy A, S i GP, oraz z  $IRI = 1,0$  do  $IRI = 3,0$

[mm/m] w przypadku dróg klasy G, spowoduje wzrost współczynnika dynamicznego odpowiednio z  $k_d = 1,03$  do  $k_d = 1,13$ , czyli o 9% (drogi klasy A, S GP) i z  $k_d = 1,02$  do  $k_d = 1,18$ , czyli o 16% (drogi klasy G). Zapewnienie wysokiej równości początkowej nawierzchni istotnie wydłuży jej trwałość i jest szczególnie ważne, gdy przewiduje się duże prędkości ruchu pojazdów, czyli na autostradach i drogach ekspresowych.

Z rysunku 4B wynika, że zmiana równości nawierzchni do granicy klasy B powoduje spadek trwałości nawierzchni aż o 30%. Zmiana klasy równości oznacza zmianę IRI z 2,0 na 4,3 [mm/m] w przypadku dróg klasy A, S i GP i prędkości  $v = 90$  km/h, oraz z 2,0 do 5,0 [mm/m] w przypadku dróg klasy G i prędkości  $v = 70$  km. Zależność uwidoczniła jak ważnym elementem w trwałości całej konstrukcji nawierzchni jest jej równość. Utrata równości podłużnej istotnie skróci trwałość nawierzchni. Z drugiej strony utrzymanie dobrej równości nawierzchni w trakcie eksploatacji istotnie spowolni proces jej degradacji.

## Podsumowanie

Dynamiczne obciążenia przekazywane przez osie pojazdów na nawierzchnie mają rozkład normalny, w którym wartość oczekiwana równa jest obciążeniu statycznemu, a odchylenie standardowe zależy od takich czynników jak równość nawierzchni, prędkość pojazdu i parametry zawieszenia.

Do oceny zmienności dynamicznych nacisków osi według literatury stosuje się następujące wskaźniki: DI (ang. *Dynamic Impact*) lub DLC (ang. *Dynamic Load Coefficient*). Wskaźniki DI i DLC charakteryzują wyłącznie dynamiczny nacisk osi, a nie dynamiczne oddziaływanie pojazdów na nawierzchnie. Wzrost wskaźnika DI lub DLC wiąże się z wywieraniem większych maksymalnych sił nacisku przez osie pojazdów, a w konsekwencji zwiększeniem oddziaływania pojazdu na nawierzchnie.

Do określenia dynamicznego oddziaływania pojazdu na nawierzchnię uwzględniono rozkład dynamicznych nacisków osi pojazdu, który jest charakteryzowany przez wskaźniki DI lub DLC, oraz funkcję współczynnika równoważności obciążeń osi pojazdu.

Współczynnik oddziaływania dynamicznego pojazdów  $k_d$  istotnie zależy od równości nawierzchni. Pogorszenie równości nawierzchni określone zmianą wskaźnika IRI do granicy klasy A, czyli do  $IRI = 2,0$  – w przypadku dróg klasy A, S i GP oraz do  $IRI = 3,0$  – w przypadku dróg klasy G, powoduje zwiększenie wartości współczynnika dynamicznego  $k_d$  od 9% do 16%. Pogorszenie równości nawierzchni do granicy klasy B (stan zadowalający) powoduje spadek trwałości zmęczeniowej nawierzchni aż o 30%.

Nadanie dobrej równości początkowej nawierzchni jezdni oraz jej utrzymanie w trakcie eksploatacji może istotnie wydłużyć trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni.

Niniejszy artykuł został przygotowany na podstawie materiałów prezentowanych na konferencji naukowej Krynica 2016 [10] oraz na Seminarium SITK 2017 i stanowi uzupełnienie do nich.

## Literatura

- [1] Cebon D., Winkler Ch.: A study of road damage due to dynamic wheel loads using a load measuring mat. Raport techniczny nr UMTRI-90-13, 1990.
- [2] Cebon D.: Handbook of Vehicle-Road Interaction, Swets & Zeitlinger, 1999.
- [3] Diagnostyka Stanu Nawierzchni i jej Elementów, Wytyczne Stosowania. Załącznik do zarządzenia nr 34 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 30.04.2015. Dostępny w Internecie: [www.gddkia.gov.pl/pl/2982/Diagnostyka-Stanu-Nawierzchni](http://www.gddkia.gov.pl/pl/2982/Diagnostyka-Stanu-Nawierzchni).
- [4] Dynamic Interaction between vehicles and infrastructure experiment (DIVINE project). Raport techniczny nr DSTI/DOT/RTR/IR6(98)1/FINAL, OECD, Paryż 1998.
- [5] Gillespie T.D., Karamihas S.M., Sayers M., Nasim M. A., Hansen W., Ehsan N., Cebon D.: Effects of heavy vehicles characteristic on pavement response and performance. Final Report, The University of Michigan, NCHRP, 1992.
- [6] Judycki J., Jaskuła P., Pszczoła M., Jaczewski M., Ryś D., Alenowicz J., Dołycki B., Stienss M.: Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. WKŁ, Warszawa, 2014.
- [7] Misaghi S., Nazarian S., Carrasco C. J.: Impact of Truck Suspension and Road Roughness on Loads Exerted to Pavements, The University of Texas, FHWA, El Paso 2010 r.
- [8] Radzikowski M., Forys G., Bogdaniuk M.: Raport o stanie technicznym nawierzchni sieci dróg krajowych na koniec 2016 roku. GDDKiA, Warszawa, 2017. Dostępny w Internecie: [www.gddkia.gov.pl/pl/2990/Raporty](http://www.gddkia.gov.pl/pl/2990/Raporty)
- [9] Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 23 grudnia 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, Dz.U. 2016 poz. 124.
- [10] Ryś D., Judycki J., Jaskuła P.: Analysis of effect of overloaded vehicles on fatigue life of flexible pavements based on weigh in motion (WIM) data. International Journal of Pavement Engineering, Volume 17, Issue 8, 2016, pp. 716-726. DOI: 10.1080/10298436.2015.1019493
- [11] Ryś D., Judycki J., Jaskuła P.: Wpływ równości nawierzchni i dynamicznego oddziaływania pojazdów ciężkich na trwałość zmęczeniową nawierzchni podatnych, Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury, Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (1/II/16), styczeń-marzec 2016, s. 291-298, doi: 10.7862/rb.2016.87
- [12] Shi X.M., Cai C. S.: Simulation of dynamic effects of vehicles on pavement using a 3D interaction model. Journal of Transportation Engineering, s. 135:736-744, ASCE, 2009.
- [13] Sweatman, P.F.: A Study of dynamic wheel forces in axle group suspensions of heavy vehicles. Australian Road Research Board, Australia 1983.