



ŁUKASZ MEJŁUN

lukasz.mejłun@wilis.pg.gda.pl



JÓZEF JUDYCKI

jozef.judycki@wilis.pg.gda.pl



BOHDAN DOŁŻYCKI

Bogdan.dolzycki@wilis.pg.gda.pl

Politechnika Gdańska

Analiza lepkosprężysta zachowania się konstrukcji nawierzchni drogowej w zależności od temperatury i warunków obciążenia

Głównymi czynnikami wpływającymi na właściwości i zachowanie się mieszanek mineralno-asfaltowych (mma) są temperatura, wielkość i czas działania obciążenia. Zwiększenie każdego z tych czynników skutkuje zmianą właściwości lepkosprężystych materiału. W konsekwencji przekłada się to na zmianę sposobu pracy asfaltowych nawierzchni drogowych. W artykule autorzy przedstawili wybrane aspekty związane z wpływem temperatury nawierzchni i parametrów obciążenia na lepkosprężyste ugięcia na powierzchni jezdni i odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych. Przyjęto rozkład temperatury odnotowany latem 2012 roku w stacji pomiarowej na drodze ekspresowej S6 w Redzikowie. Przedstawiono różnice w zachowaniu się nawierzchni w czasie upalnego letniego dnia w przypadku temperatur przedpołudniowych (godz. 10:30) i wieczornych (godz. 19:30), gdy powierzchnia jezdni posiadała jednakową temperaturę 40°C, natomiast rozkład

temperatury w warstwach asfaltowych był różny. Dodatkowo przeprowadzono analizę wpływu prędkości ruchu i ciężaru koła na ugięcia powierzchni jezdni w typowej konstrukcji nawierzchni podatnej dla ruchu KR7.

Zakres przeprowadzonych prac

W celu wykonania analiz przeprowadzono następujące działania:

- Na podstawie wyników badania pod obciążeniem powtarzalnym wyznaczono dla mma parametry lepkosprężystego modelu Burgersa.
- Na podstawie rzeczywistych temperatur powierzchni jezdni wyznaczono dwa rozkłady temperatur w warstwach asfaltowych dla dwóch sytuacji (przed południem i wieczorem). Do analiz przyjęto sytuację, w której powierzchnia jezdni posiadała taką samą temperaturę (40°C).
- Na podstawie [6] przyjęto typową podatną konstrukcję nawierzchni, w której warstwy asfaltowe podzielono na podwarstwy. W przypadku każdej podwarstwy, na podsta-

wie wyników badań oraz rozkładów temperatury, określono parametry reologiczne modelu Burgersa.

- Przyjęto obciążenie konstrukcji nawierzchni.
- Wykonano obliczenia komputerowe ugięć i odkształceń w przyjętej konstrukcji nawierzchni.
- Otrzymane wyniki poddano analizom pod kątem wpływu rozkładu temperatury na ugięcia na powierzchni jezdni i odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych oraz wpływu parametrów obciążenia na ugięcia na powierzchni jezdni.

Dane wejściowe do analiz

Badania pod obciążeniem powtarzalnym

Badania laboratoryjne mma pod obciążeniem powtarzalnym zostały wykonane w ramach prac prowadzonych na zlecenie GDDKiA [3] w celu określenia ich właściwości lepkosprężystych i parametrów modelu Burgersa. Zbadano następujące materiały:

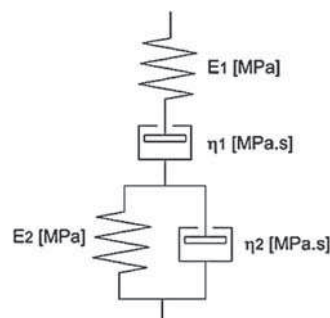
- SMA 8 do warstwy ścieralnej z asfaltem 45/80-55, wg [12];
- AC 16 do warstwy wiążącej z asfaltem 35/50, wg [12];
- AC 22 do warstwy podbudowy z asfaltem 35/50, wg [12].

Badanie zostało szerzej opisane w [3,4], a jego wyniki w przypadku wymienionych materiałów zaprezentowane w [3].

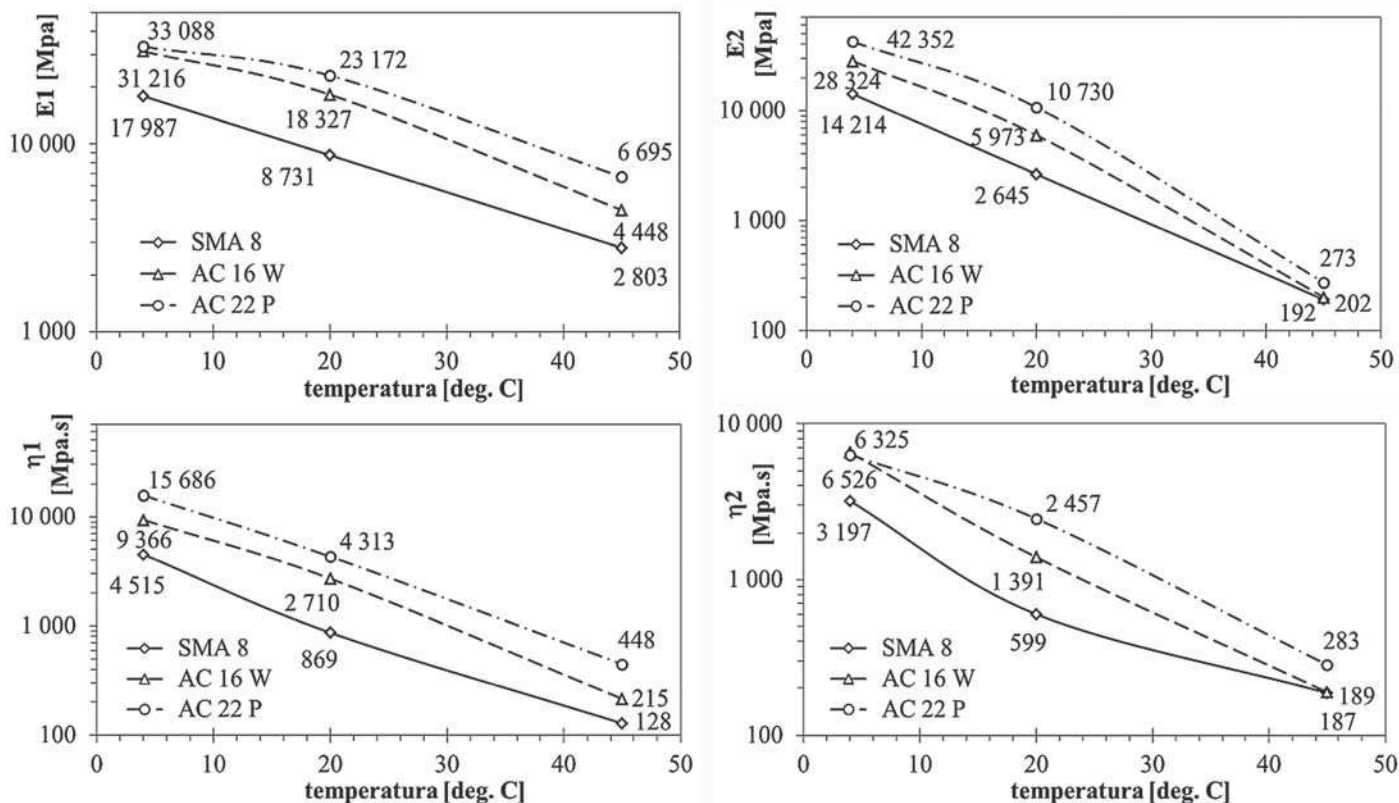
Parametry modelu lepkosprężystości Burgersa

Do analiz mma przyjęto lepkosprężysty model Burgersa (rys. 1) charakteryzowany przez moduły sprężystości E_1 i E_2 oraz współczynniki lepkości η_1 i η_2 i opisany zależnością (1) zwaną równaniem stanu [6]:

$$\sigma(t) \times \left(D^2 \frac{\eta_1 \times \eta_2}{E_1 \times E_2} + D \frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_2}{E_2} + 1 \right) = \varepsilon(t) \times \left(D^2 \frac{\eta_1 \times \eta_2}{E_2} + D \eta_1 \right) \quad (1)$$



Rys. 1. Model lepkosprężystości Burgersa



Rys. 2. Zależności parametrów modelu Burgersa od temperatury

w którym: t – czas, σ – naprężenie, ε – odkształcenie, D – pierwsza pochodna względem czasu, D^2 – druga pochodna względem czasu. Parametry modelu Burgersa określono na podstawie $|E^*|$ i φ z badania pod obciążeniem powtarzalnym [3]. Do tego celu użyto podprogramu DEBUROAD wchodzącego w skład oprogramowania VERROAD. Na rys. 2 pokazano wyznaczone parametry modelu Burgersa w zależności od temperatury.

Przyjęcie konstrukcji nawierzchni

Na podstawie [7] przyjęto typową konstrukcję podatną dla kategorii ruchu KR7. Układ warstw w przyjętej konstrukcji przedstawiono na rysunku 3. Wszystkie warstwy asfaltowe modelowano jako materiały lepkosprężyste z zastosowaniem modelu Burgersa. Podbudowę niezwiązaną z kruszywa oraz podłoże gruntowe modelowano jako materiały sprężyste. Z powodu zależności właściwości m od zmiennej temperatury w zależności od grubości, warstwy asfaltowe podzielono na podwarstwy o grubości 3 lub 4 cm (rys. 3). Przyjęto, że temperaturą reprezentatywną każdej podwarstwy asfaltowej będzie temperatura występująca w środku jej grubości.

Dla każdej podwarstwy asfaltowej, na podstawie wyników badań oraz przyjętych rozkładów temperatury, określono parametry modelu Burgersa, co przedstawiono w dalszej części artykułu. W przypadku pozostałych warstw, przyjęto wg [7] następujące moduły sprężystości E oraz współczynniki Poissona ν :

- do podbudowy niezwiązanej – $E = 400$ MPa, $\nu = 0,30$;
- do ulepszonego podłoża gruntowego nawierzchni – $E = 120$ MPa, $\nu = 0,35$.

Przyjęcie temperatury nawierzchni i parametrów warstw asfaltowych

Do analiz przyjęto rzeczywisty dobowy rozkład temperatury powierzchni jezdni zarejestrowany w okresie 24-26 lipca 2012 roku w stacji pomiarowej GDDKiA w m. Redzikowo (droga ekspresowa S6) i przedstawiony na rysunku 5. Dobowe zmiany temperatury w analizowanym okresie opisano funkcją sinusoidalną (6):

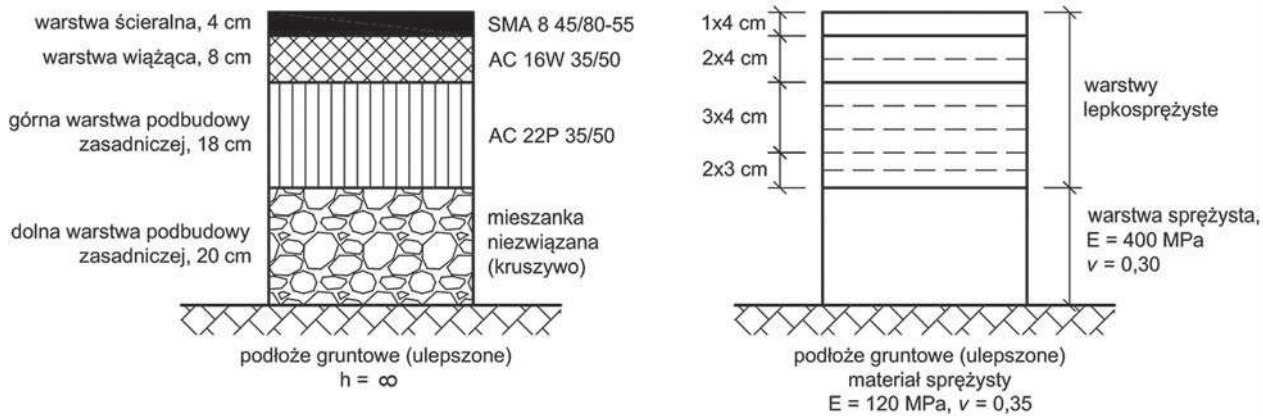
$$T_0(t) = T_M + T_A \times \sin\left(2\pi \times \frac{t}{24} + \tau\right) \quad (6)$$

w której:

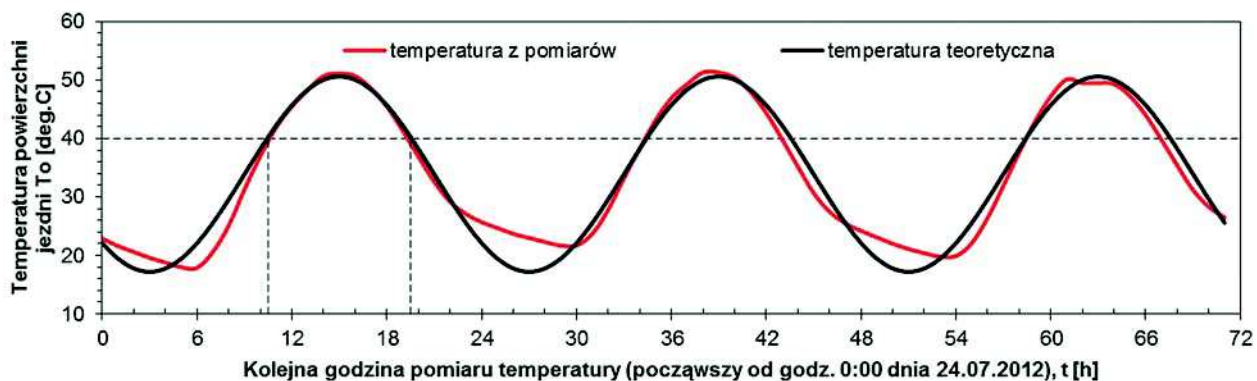
- $T_0(t)$ – temperatura powierzchni jezdni w godzinie t ,
- T_M – średnia trzydobowa temperatura powierzchni jezdni (33,9°C),
- T_A – trzydobowa amplituda zmienności temperatury powierzchni jezdni (16,7°C),
- τ – parametr dopasowania funkcji ($\tau = 1,25$ m).

Na rysunku 4. podano graficzne porównanie dobowych zmian temperatury powierzchni jezdni odnotowanych na stacji pomiarowej i opisanych funkcją (6).

Do analiz wpływu temperatury przyjęto dwie sytuacje, w których powierzchnia jezdni miała temperaturę $T_0 = +40^\circ\text{C}$, czyli ok. godz. 10:30 i ok. godz. 19:30. Wybór temperatury był celowy, aby pokazać różnice w zachowaniu się konstrukcji nawierzchni przed południem i wczesnym wieczorem przy tej samej temperaturze powierzchni jezdni. Funkcję rozkładu temperatury na głębokości (7) wyznaczono uwzględniając za Judyckim [4] zależność (6) oraz rozwiązanie równania różniczkowego przepływu ciepła w ośrodku jednorodnym.



Rys. 3. Przyjęta konstrukcja nawierzchni [7] i podział warstw asfaltowych na podwarstwy



Rys. 4. Temperatura powierzchni jezdni w okresie 24-26 lipca 2012 roku zarejestrowana na stacji pomiarowej Redzikowo (droga krajowa nr S6)

$$T_0(t) = T_M + T_A \times \exp(-\lambda z) \times \sin\left(2\pi \times \frac{t}{24} - \lambda z + \tau\right) \quad (7)$$

w którym:

$T_0(t)$, T_M , T_A , t , τ – jak zgodnie z opisem w (6),
 z – głębokość,

λ – parametr zależny od właściwości termicznych mma, równy:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\pi \times \gamma \times C}{24K}} \quad (8)$$

w którym:

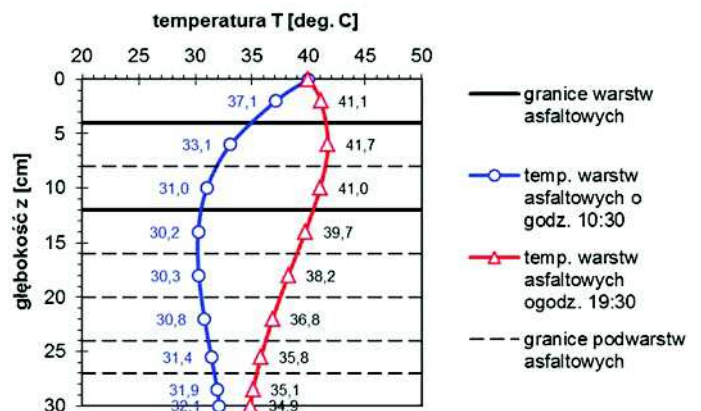
C – ciepło właściwe,

γ – gęstość pozorną,

K – współczynnik przewodności cieplnej.

Zgodnie z [5] przyjęto: $C = 920 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, $\gamma = 2400 \text{ kg/m}^3$ oraz $K = 5190 \text{ J/mh}^\circ\text{C}$. Na rysunku 5 podano rozkłady temperatur na głębokości warstw asfaltowych w różnych porach dnia, przy tej samej temperaturze powierzchni jezdni.

Z obliczeń wynika, że mimo jednakowej temperatury powierzchni jezdni, warstwy asfaltowe mogą mieć różny rozkład temperatury w różnych porach dnia. W godzinach przedpołudniowych nawierzchnia, która uległa ochłodzeniu w ciągu nocy, zaczyna ogrzewać się od góry ku dołowi – niższe warstwy mają niższą temperaturę niż warstwy położone wyżej. Wieczorem, wraz ochładzaniem się powietrza, warstwy asfaltowe zaczynają oddawać zgromadzone ciepło. Dlatego temperatura powierzchni jezdni może być nieco niższa niż temperatura warstw położonych głębiej.



Rys. 5. Rozkłady temperatur w warstwach asfaltowych przed południem i wieczorem przy tej samej temperaturze powierzchni jezdni

Obliczenia i analizy wpływu temperatury na zachowanie się nawierzchni wykonano w obu opisanych sytuacjach. Do analiz wpływu parametrów obciążenia wybrano jeden, bardziej niekorzystny przypadek rozkładu temperatury, który występował w godzinach wieczornych.

Parametry warstw asfaltowych

Wszystkie warstwy asfaltowe modelowano jako materiały lepkosprężyste o właściwościach zależnych od temperatury. Parametry modelu Burgersa wyznaczono metodą interpolacji nieliniowej wyników do każdego z dwóch analizowanych

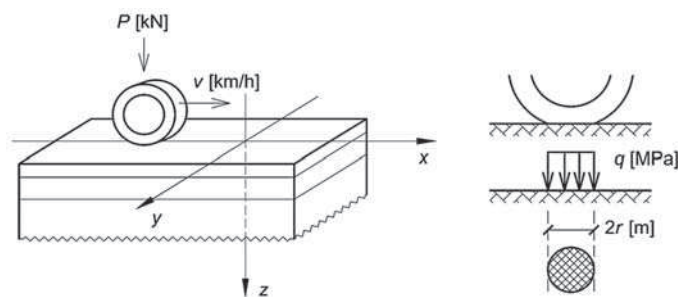
Tabela 1. Parametry warstw asfaltowych dla $T(z = 0) = 40^{\circ}\text{C}$

Warstwa konstrukcyjna	Grubość podwarstwy	Głębokość środka podwarstwy	Temperatura reprezentatywna podwarstwy	Parametry modelu Burgersa				Współczynnik Poissona
	h [cm]	z [cm]	T [$^{\circ}\text{C}$]	E_1 [Mpa]	E_2 [Mpa]	η_1 [Mpa·s]	η_2 [Mpa·s]	ν [-]
Godzina 10:30								
Ścieralna (SMA 8)	4	2,0	37,1	3 369	316	181	239	0,458
Wiążąca (AC 16W)	4	6,0	33,1	10 095	942	685	499	0,444
	4	10,0	31,0	11 268	1 216	833	598	0,436
Podbudowa asfaltowa (AC 22P)	4	14,0	30,2	16 309	2 195	1 662	995	0,433
	4	18,0	30,3	16 272	2 177	1 654	989	0,433
	4	22,0	30,8	15 946	2 026	1 582	938	0,435
	3	25,5	31,4	15 560	1 861	1 502	879	0,438
3	28,5	31,9	15 218	1 726	1 435	830	0,440	
Godzina 19:30								
Ścieralna (SMA 8)	4	2,0	41,1	2 793	198	123	211	0,469
Wiążąca (AC 16W)	4	6,0	41,7	5 836	330	308	238	0,470
	4	10,0	41,0	6 143	359	328	253	0,468
Podbudowa asfaltowa (AC 22P)	4	14,0	39,7	10 207	573	730	349	0,465
	4	18,0	38,2	11 171	708	831	406	0,461
	4	22,0	36,8	12 069	863	938	475	0,457
	3	25,5	35,8	12 728	998	1 025	534	0,454
3	28,5	35,1	13 183	1 103	1 090	580	0,451	

rozkładów temperatury, oddzielnie w przypadku każdej podwarstwy. Współczynniki Poissona do każdej podwarstwy wyznaczono na podstawie zależności zaprezentowanej w [10]. W tabeli 1 zestawiono wszystkie parametry warstw asfaltowych nawierzchni.

Założenia w zakresie obciążenia nawierzchni

Przyjęto obciążenie nawierzchni kołem pojedynczym poruszającym się wzdłuż osi x układu współrzędnych od $x = -\infty$ do $x = +\infty$. Oś z prezentuje głębokość, a oś y wymiar poprzeczny. Analizowany przekrój nawierzchni występuje w miejscu $x = 0$.



Rys. 6. Układ współrzędnych i sposób obciążenia nawierzchni

Do analizy wpływu rozkładu temperatury przyjęto: ciężar koła $P = 50$ kN, ciśnienie kontaktowe $q = 850$ kPa rozłożone równomiernie na powierzchni kołowej o promieniu $r = 0,137$ m oraz prędkość ruchu koła $v = 60$ km/h. Jest to typowe obciążenie przyjmowane w analizie konstrukcji nawierzchni.

Do analizy wpływu parametrów obciążenia na zachowanie się konstrukcji nawierzchni przyjęto parametry podane w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry obciążenia nawierzchni

P [kN]	q [kPa]	r [m]
30	600	0,126
40	650	0,140
50	850	0,137
60	900	0,146
70	900	0,157
80	900	0,168

Ciśnienia kontaktowe q dobrano w zależności od P na podstawie [8]. W przypadku każdej pary q i P obliczono promień śladu zastępczego koła r . W przypadku analizy wpływu parametrów v i P na zachowanie się nawierzchni obliczenia wykonano dla wszystkich kombinacji P [kN] = {30, 40, 50, 60, 70, 80} oraz v [km/h] = {5, 15, 30, 60, 90, 120}.

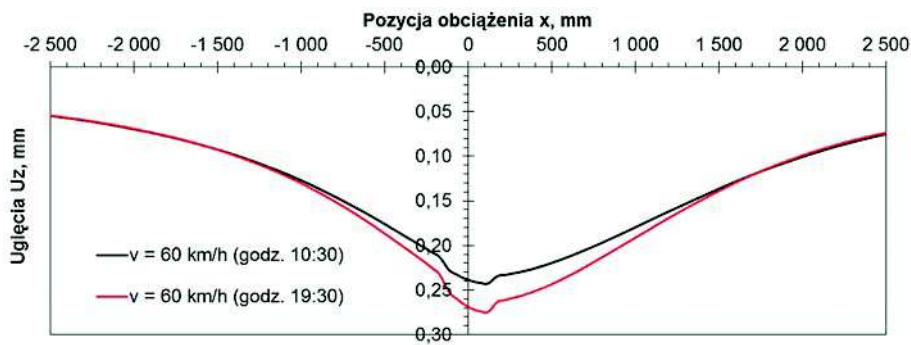
Wyniki obliczeń i ich analiza

Obliczenia oraz analizy wykonano w dwóch wersjach, analizując:

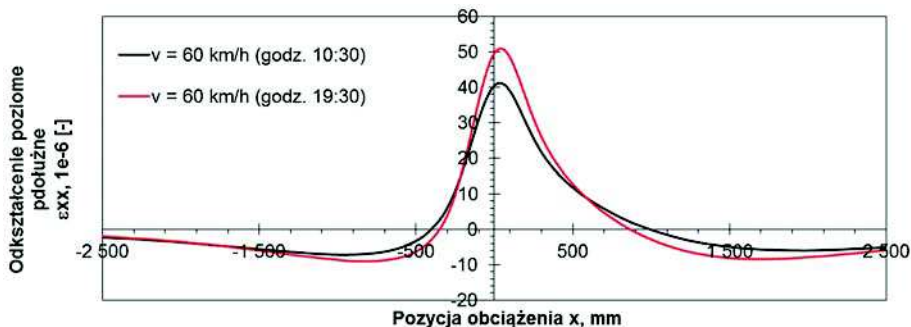
- wpływ rozkładu temperatury na ugięcia U_z na powierzchni jezdni ($z = 0$) oraz odkształcenia poziome podłużne ε_{xx} na spodzie warstw asfaltowych ($z = 30$ cm);
- wpływ parametrów obciążenia (v i P) na ugięcia U_z na powierzchni jezdni ($z = 0$).

Analiza wpływu rozkładu temperatury

Na podstawie analizy samych rozkładów temperatury (rys. 5) można stwierdzić, że w godzinach wieczornych poruszające się pojazdy będą powodowały większe ugięcia na powierzchni jezdni oraz większe odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych niż w godzinach przedpołudniowych. Jednak oszacowanie różnic między obiema porami



Rys. 7. Ugięcia U_z na powierzchni jezdni ($z = 0$) w zależności od położenia obciążenia



Rys. 8. Odształcenia ϵ_{xx} spodu warstw asfaltowych ($z = 30$ cm) w zależności od pozycji obciążenia

dnia jest zagadnieniem złożonym, z tego względu obliczenia wykonano do obu rozkładów temperatury.

Na rysunku 7 zaprezentowano przebieg zmian ugięć na powierzchni jezdni w trakcie przemieszczania się koła z prędkością $v = 60$ km/h przed południem (godz. 10:30) i we wczesnych godzinach wieczornych (godz. 19:30). Wartości $x < 0$ oznaczają, że koło znajduje się w odległości $|x|$ przed analizowanym miejscem w nawierzchni ($x = 0$), wartości $x > 0$ oznaczają, że koło przejechało już nad analizowanym punktem – znajduje się w odległości $|x|$ od niego.

Maksymalne U_z występuje w obrębie tylnej krawędzi śladu koła – w momencie, gdy zjeżdża ono z nad analizowanego miejsca. W przypadku rozkładu temperatury o godzinie 10:30 maksymalne $U_z = 0,24$ mm, natomiast w przypadku rozkładu z godziny 19:30 maksymalne $U_z = 0,27$ mm, co stanowi o ok. 13% różnicę. Zaznaczyć należy, że ugięcie to jest częściowo odwracalne, tzn. że tylko pewna deformacja powierzchni jezdni będzie miała charakter trwały (pozostanie w nawierzchni po całkowitym ustąpieniu obciążenia). W niniejszym artykule nie analizowano deformacji trwałych.

Na rysunku 8 zaprezentowano wyniki obliczeń odształceń poziomych podłużnych ϵ_{xx} na spodzie warstw asfaltowych ($z = 30$ cm) w zależności od pozycji x koła. Wartości dodatnie odształceń oznaczają rozciąganie, ujemne zaś ściszenie.

Podczas przejazdu koła spód warstw asfaltowych podlega naprzemiennemu ściszeniu, rozciąganiu i ponownie ściszeniu. Odształcenia ściszące występują zanim koło dojedzie do analizowanego punktu nawierzchni ($x < -r$) oraz w odległościach $x > 1$ m. Maksymalne odształcenie ściszące podczas przejazdu koła wynosi dla temperatur:

- przedpołudniowych:
 - o przed kołem $-7,2 \times 10^{-6}$ [-],
 - o za kołem $-6,0 \times 10^{-6}$ [-],
- wieczornych:
 - o przed kołem $-9,0 \times 10^{-6}$ [-],
 - o za kołem $-8,5 \times 10^{-6}$ [-].

Oznacza to, że w analizowanej sytuacji spód nawierzchni wieczorem będzie podlegał odkształceniom ściszącym większym o 25% przed kołem i o 42% za kołem niż przed południem przy tej samej temperaturze powierzchni jezdni.

Maksymalne odkształcenie rozciągające na spodzie warstw asfaltowych występuje w okolicy osi pionowej obciążenia ($x = 0$) i wynosi w przypadku temperatur:

- przedpołudniowych -41×10^{-6} [-],
 - wieczornych -51×10^{-6} [-];
- co stanowi ok. 24% różnicę. Warto zauważyć, że spód warstw asfaltowych jest przede wszystkim rozciągany – maksymalne odkształcenie rozciągające jest ponad czterokrotnie większe niż maksymalne odkształcenie ściszące.

Analiza wpływu parametrów obciążenia

Przeprowadzona analiza obejmowała wpływ prędkości ruchu i ciężaru koła na ugięcia na powierzchni jezdni ($z = 0$) w warunkach wysokich temperatur. Z dwóch analizowanych rozkładów temperatury wybrano bardziej niekorzystny (dla godziny 19:30). Analizę przeprowadzono na podstawie wyników obliczeń wykonanych dla wszystkich kombinacji prędkości v [km/h] = {5, 15, 30, 60, 90, 120} i obciążenia P [kN] = {30, 40, 50, 60, 70, 80}.

Wyniki ugięć (dla każdego ciężaru koła P) zostały przybliżone za pomocą potęgowej funkcji prędkości, zgodnie z 10):

$$U_z^{\max} = a \times v^b \quad (10)$$

w której:

U_z^{\max} – maksymalne ugięcie na powierzchni jezdni podczas przejazdu koła,

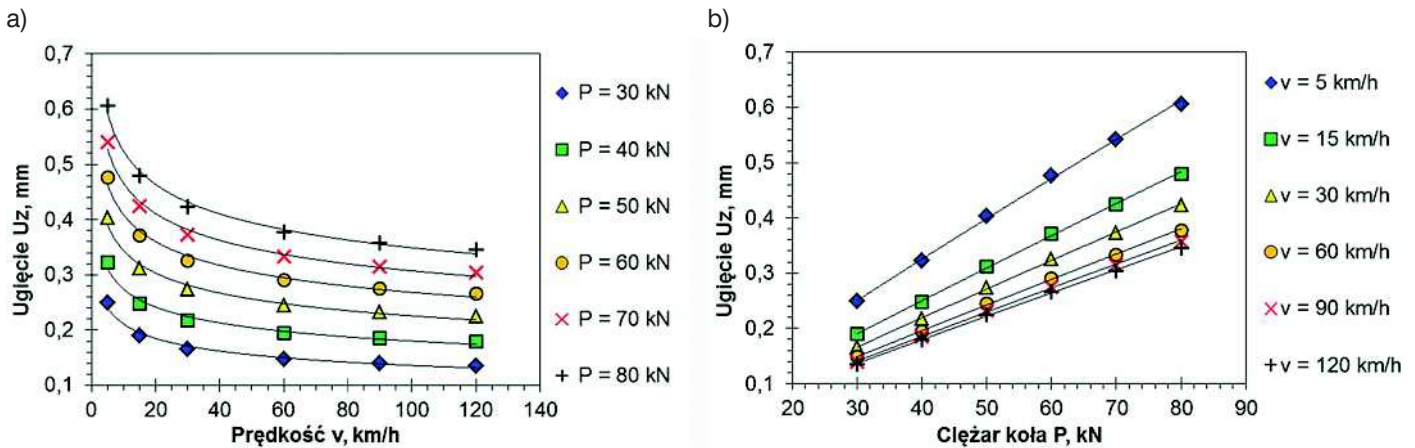
a, b – współczynniki funkcji zależne od ciężaru koła P [kN],

v – prędkość ruchu w km/h.

Wartości a i b oraz współczynniki determinacji R^2 dla każdego P podano w tabeli 3.

Tabela 3. Wartości a i b oraz współczynniki determinacji R^2

P [kN]	a [-]	b [-]	R^2 [-]
30	0,3276	-0,191	0,992
40	0,4185	-0,183	0,991
50	0,5254	-0,183	0,989
60	0,6236	-0,183	0,986
70	0,7066	-0,181	0,982
80	0,7874	-0,177	0,985



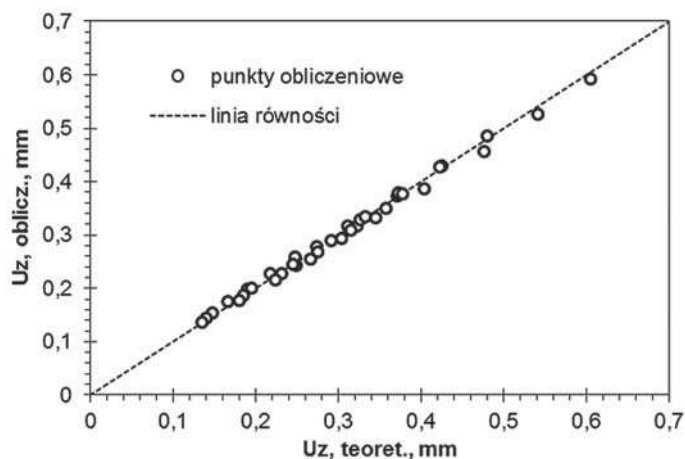
Rys. 9. Ugięcia na powierzchni jezdni dla analizowanych prędkości ruchu koła o różnym ciężarze

Jako, że wykładnik potęgi b zmienia się w niewielkim zakresie wraz ze zmianą P , a zmiany te są mało znaczące dla U_z , przyjęto średnią wartość $b = const = -0,183$ dla wszystkich P .

Wartość a uzależniono od ciężaru koła P zgodnie z (11).

$$a(P) = \alpha \times P^\beta \quad (11)$$

w którym współczynniki funkcji są równe: $\alpha = 0,0149$ i $\beta = 0,9079$ przy $R^2 = 0,999$.



Rys. 10. Porównanie wyników obliczeń U_z

Na podstawie tego zapisano ogólne równanie na U_z dane zależnością (12).

$$U_z(v, P) = a(P) \times v^b = \alpha \times P^\beta \times v^b = 0,0149 \times P^{0,9079} \times v^{-0,183} \quad (12)$$

Na rysunku 10 zilustrowano zależność wartości $U_{z, \text{teoret.}}$ (uzyskanych z obliczeń w programie komputerowym) od wartości $U_{z, \text{oblicz.}}$ (wyznaczonych ze wzoru (12)).

W celu analizy wpływu parametrów obciążenia na ugięcia wyznaczono pochodne cząstkowe funkcji (12) względem prędkości v (13) i ciężaru koła P (14).

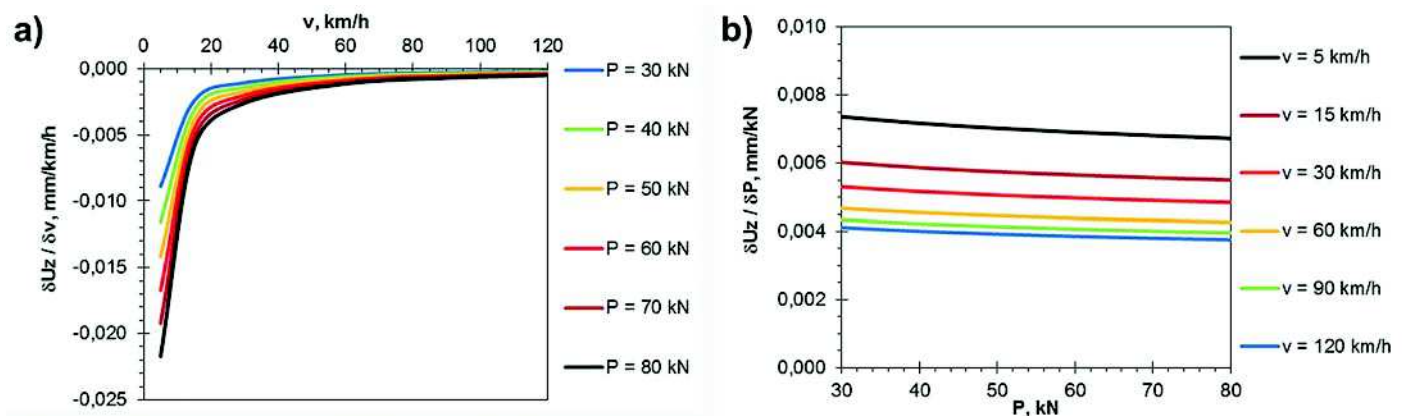
$$\frac{\delta U_z(v, P)}{\delta v} = -0,0027 \times P^{0,9079} \times v^{-1,183} \quad (13)$$

$$\frac{\delta U_z(v, P)}{\delta P} = 0,0135 \times P^{-0,0921} \times v^{-0,183} \quad (14)$$

Wartości pochodnych (13) i (14) zaprezentowano odpowiednio na rys. 11 a) oraz 11 b).

Uzyskano bardzo dobrą korelację ($R^2 = 0,998$) przy średnim błędzie szacunku rzędu 0,008 mm. Oznacza to, że w analizowanym zakresie P i v nie popełniamy błędu większego niż $\pm 5\%$ wartości U_z wyznaczonych z obliczeń komputerowych.

W przypadku analizy wpływu prędkości ruchu na ugięcia na powierzchni jezdni (rys. 11a) można stwierdzić, że wartości pochodnej są ujemne i dążą asymptotycznie do zera wraz



Rys. 11. Pochodne cząstkowe funkcji ugięć względem: a) prędkości ruchu, b) ciężaru koła

z rosnącym v . W praktyce oznacza to, że wraz ze wzrostem prędkości ugięcia maleją, dążąc do pewnej wartości stałej. Ponadto, przy małych prędkościach ruchu (do 15 km/h) redukcja v powoduje znaczące zmniejszenie wartości pochodnej, a co za tym idzie znaczący wzrost ugięć. Przy małych prędkościach ugięcia są istotnie większe niż dla $v > 15$ km/h.

W przypadku analizy wpływu ciężaru koła na ugięcia na powierzchni jezdni (rys. 11b) można stwierdzić, że wartość pochodnej cząstkowej zmienia się nieznacznie wraz ze zmianą P . Oznacza to, że taka sama zmiana P ma podobny wpływ na ugięcia zarówno dla małych, jak i dużych ciężarów koła, a zależność $U_z(P)$ jest bliska liniowej. Dodatkowo wartości pochodnej cząstkowej oznaczają, że wzrost ciężaru koła powoduje wzrost ugięć nawierzchni.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę wpływu rozkładu temperatury w warstwach asfaltowych oraz prędkości i ciężaru koła na ugięcia na powierzchni jezdni, a także na odkształcenia poziome spodu warstw asfaltowych w warunkach wysokiej temperatury. Wykonane obliczenia i przeprowadzone analizy ich wyników pozwoliły stwierdzić, że:

- (1) Sposób pracy nawierzchni asfaltowej w warunkach wysokiej temperatury jest złożony. Oprócz rozkładu temperatury i parametrów obciążenia reakcja nawierzchni zależy także od pozycji (odległości) poruszającego się koła. Zastosowanie metod obliczeniowych uwzględniających jego ruch umożliwia wykonanie szerokich analiz lepkosprężystych konstrukcji nawierzchni w trakcie trwania całego przejazdu koła po nawierzchni.
- (2) Reakcja nawierzchni na obciążenie w sposób istotny zależy od temperatury, przy czym przy tej samej temperaturze powierzchni jezdni warstwy asfaltowe mogą mieć różny rozkład temperatury, a zatem i sposób pracy nawierzchni może być odmienny. Wykazano, że ugięcia i odkształcenia występujące w porze wieczornej są znacząco większe niż przed południem, mimo że temperatura powierzchni jezdni w obu przypadkach była taka sama.
- (3) Zależność ugięć powierzchni jezdni od prędkości ruchu pojazdów nie jest liniowa. Zmniejszenie prędkości w ruchu powolnym powoduje znacząco większy wzrost ugięć, niż redukcja większych wartości tego parametru. Stwarza to pewne ryzyko powstawania trwałych deformacji warstw asfaltowych, zwłaszcza w przypadku np. stref ruchu powolnego, w miejscach dojazdów do skrzyżowań, placów, czy parkingów.

- (4) Zależność ugięć powierzchni jezdni od ciężaru koła w przeprowadzonej analizie lepkosprężystej jest zbliżona do liniowej. Oznacza to, że taka sama zmiana obciążenia powoduje podobną zmianę ugięcia nawierzchni zarówno przy małych, jak i dużych obciążeniach. Ugięcia nawierzchni podczas przejazdu koła przy małych prędkościach są nieco bardziej wrażliwe na zmianę ciężaru koła, niż w przypadku większych prędkości.

Niniejszy artykuł jest częścią prac nad rozprawą dokorską prowadzonych przez mgr. inż. Łukasza Mejluna na Politechnice Gdańskiej pod kierunkiem prof. Józefa Judyckiego oraz dr. Bohdana Dożyckiego. Część badań wykonano w ramach pracy badawczej wykonanej na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad pt.: *Badanie wpływu zastosowania warstw betonu asfaltowego o wysokim module sztywności (AC-WMS) w konstrukcjach nawierzchni na spękania niskotemperaturowe i na zmniejszenie powstawania deformacji trwałych*.

Bibliografia:

- [1] H. Borkowski, J. Judycki, *Reologia betonu asfaltowego i konstrukcji nawierzchni*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Nr 406, Gdańsk 1987
- [2] M. Jaczewski, Ł. Mejlun, *Wyznaczanie parametrów lepkosprężystego modelu Burgersa mieszanek mineralno-asfaltowych na podstawie badania pod obciążeniem dynamicznym*, Drogownictwo, Nr 11/2013
- [3] J. Judycki, i in., *Badanie wpływu zastosowania warstw betonu asfaltowego o wysokim module sztywności (AC-WMS) w konstrukcjach nawierzchni na spękania niskotemperaturowe i na zmniejszenie powstawania deformacji trwałych*, Gdańsk 2012
- [4] J. Judycki, *Drogowe asfalty i mieszanki mineralno-asfaltowe modyfikowane elastomerem*, praca habilitacyjna, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Nr 452, Gdańsk 1991
- [5] J. Judycki, *Modele reologiczne betonu asfaltowego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Nr 368, Gdańsk 1984
- [6] *Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych*, Politechnika Gdańska 2013
- [7] Ł. Mejlun, J. Judycki, *Analiza konstrukcji nawierzchni asfaltowych oparta o teorię lepkosprężystości*, Drogownictwo, Nr 10/2012
- [8] D. Ryś, *Obciążenie dróg przez pojazdy ciężkie i ich wpływ na trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*, Praca doktorska, Politechnika Gdańska 2015
- [9] *VEROAD: "User manual"*, Version 2000 April. Appendix B: "Additional Theory", NPC bv, Utrecht, Netherlands 2000
- [10] E. J. Yoder, M. W. Witczak, *Principles of Pavement Design*, 2nd Edition, John Wiley & Son Inc., New York 1975
- [11] M. Witczak, NCHRP Project 9-19: *Simple Performance Tests: Summary of Recommended Methods and Database*. Final Report for 9-19
- [12] WT-2: 2010, nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania techniczne

Zapraszamy do prenumerowania DROGOWNICTWA w 2015 roku

cena 1 egzemplarza 19 zł }
prenumerata roczna 216 zł } (w tym 5% VAT)

Dla studentów 50% niżki

Uprzejmie informujemy Szanownych Prenumeratorów, że egzemplarze „Drogownictwa” oraz faktury będą wysyłane po przesłaniu zamówienia na adres prenumerata@sitk.org oraz po wpłaceniu należnej kwoty na nasze konto:

38 1160 2202 0000 0000 2741 3872

Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Zarząd Krajowy
ul. Czackiego 3/5, 00-043 Warszawa

Redakcja