



ŁUKASZ MEJŁUN

Politechnika Gdańska  
lukmejlu@pg.gda.pl



JÓZEF JUDYCKI

Politechnika Gdańska  
jozef.judycki@wilis.pg.gda.pl

## Analiza konstrukcji nawierzchni asfaltowych oparta o teorię lepkości

*W projektowaniu konstrukcji nawierzchni drogowych typu podatnego powszechnie stosuje się obecnie teorię sprężystości. Wiadomo jednak, że warstwy wykonane z mieszanek mineralno-asfaltowych, w szczególności w wyższych zakresach temperatury, nie są w pełni sprężyste lecz wykazują także właściwości lepkie. Powstaje zatem pytanie – w jakich warunkach uzasadnione jest stosowanie modelu sprężystego warstw, a w jakich modelu lepkościowego? Niniejszy artykuł został napisany na podstawie pracy magisterskiej współautora [11] realizowanej w Katedrze Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej. Przybliżono w nim Czytel-*

*nikom modelowanie lepkościowe przykładowej nawierzchni podatnej przy użyciu programu komputerowego VEROAD.*

### Rys historyczny

Teoria lepkości, która jest coraz częściej stosowana do analizy konstrukcji nawierzchni asfaltowych, jest częścią dziedziny nauki zwanej reologią. Reologia jest nauką o płynięciu i deformacji materiałów i konstrukcji poddanych obciążeniom mechanicznym i termicznym z uwzględnieniem czasu działania obciążenia. Obejmuje zagadnienia lepkości, plastyczności i mechanizmy zniszczenia materiałów podczas obciążenia działającego w czasie w sposób statyczny lub dynamiczny. Według M. Reinera i A.G. Warda [15] pierwsze prace naukowe z zakresu reologii powstały w latach 30-tych XX wieku. Burzliwy rozwój tej dziedziny nastąpił w latach powojennych od lat 50-tych XX wieku. Bardzo szybko reologia zaczęła zajmować się materiałami i konstrukcjami budowlanymi, w tym również drogowymi. W Polsce podwaliny pod zastosowania reologii w budownictwie położyli I. Kisiel ze współpracownikami [8,9] oraz W. Nowacki [13].

Spośród wszystkich konstrukcji budowlanych, nawierzchnie asfaltowe najbardziej odpowiadają opisom reologicznym, ze względu na wielką zależność ich odkształceń od czasu działania obciążenia ruchem pojazdów i temperatury. Już w fundamentalnej pracy [15] opublikowanej w 1954 r. pod redakcją M. Reinera i A.G. Warda znajduje się rozdział dotyczący reologii materiałów i nawierzchni asfaltowych napisany przez C. Van der Poela [17]. Ważną pracą w zakresie reologii i lepkości betonu asfaltowego był artykuł C.L. Monismitha i współpracowników [12] z 1966 r. Lista prac badawczych z tego zakresu opublikowanych w świecie jest bardzo

długa. W tym artykule ograniczono się do wymienienia kilku prac wykonanych w Polsce.

Badania reologii materiałów i nawierzchni drogowych rozpoczęto po raz pierwszy w Polsce na Politechnice Gdańskiej w latach 70-tych ubiegłego wieku. Zorganizowano tam w 1974 r. międzynarodową konferencję naukową pt. *Reologia konstrukcji jezdni i materiałów drogowych* [10]. Pierwszą pracą badawczą z zakresu reologii betonu asfaltowego w Polsce był doktorat J. Judyckiego [5] z 1975 r. i późniejsze prace wykonane z H. Borkowskim [2,3]. M. Kalabińska i J. Piłat z Politechniki Warszawskiej opublikowali w 1982 r. książkę dotyczącą reologii asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych [7]. J. Zawadzki i J. Szczęsna z IBDiM opublikowali dwie prace dotyczące odkształcalności betonu asfaltowego w czasie i jego modeli reologicznych [16,18]. H. Borkowski i J. Judycki [2], a później M. Pszczoła [14] stosowali teorię lepkości do analizy odporności nawierzchni na spękania niskotemperaturowe.

Rozwiązania teoretyczne teorii lepkości w zastosowaniu do nawierzchni asfaltowych powstały w latach 70-tych XX wieku, ale były zbyt skomplikowane w sensie matematycznym, aby można było z nich korzystać w praktyce. Powstawały rozwiązania numeryczne oparte o metodę elementów skończonych. Sytuacja zmieniła się, gdy w 1996 r. P.C. Hopman z Uniwersytetu Technicznego w Delft (Holandia) opracował program komputerowy VEROAD (skrót od *Viscoelastic Road Analysis Delft*) [4]. Program jest dostępny na zasadach komercyjnych. Jest trudny w praktycznych zastosowaniach, ale umożliwia lepkościową analizę nawierzchni asfaltowych. Program ten zastosowali K. Błażejowski i współpracownicy [1] do analizy polskich konstrukcji nawierzchni. Obecnie ograniczeniem we wdrożeniu praktycznym teorii lepkości jest trudna dostępność wiarygodnych parametrów reologicznych warstw asfaltowych.

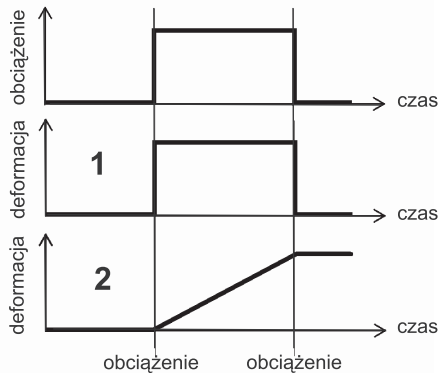
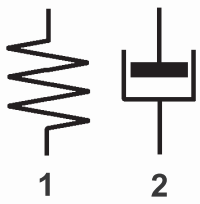
### Modelowanie mieszanek mineralno-asfaltowych (mma) w nawierzchniach drogowych

Mieszanki mineralno-asfaltowe są materiałem, którego właściwości mechaniczne i sposób pracy w nawierzchniach podatnych zależą od ich temperatury. Przy ujemnych i niskich dodatnich wartościach temperatury mma zachowują się w sposób sprężysty, a wraz z jej wzrostem coraz bardziej zaczyna dominować lepkość. Zakres temperatury, w którym obserwujemy wpływ sprężystych i lepkich właściwości jednocześnie, nazywamy przedziałem lepkościowych właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej.

Sprężystość wykazują materiały związane spoiwami hydraulicznymi, płyty z betonu cementowego i w znacznym

stopniu zagęszczone warstwy z kruszywa niezwiązanego. Sprężystość odpowiada za w pełni odwracalne deformacje w nawierzchni, a jej miarą jest moduł sprężystości  $E$  [MPa]. W modelach materiałów przyjęło się oznaczać tą właściwość jako sprężynę Hooke'a (1 na rys. 1).

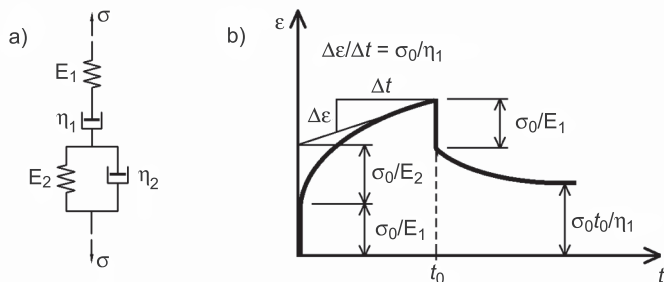
Lepiszczce asfaltowe w wyższych zakresach dodatniej temperatury jest materiałem lepkiem, którego właściwości zależą od wartości temperatury. Im wyższa temperatura, tym niższa lepkość asfaltu i w konsekwencji mma. Lepkość określana jest współczynnikiem lepkości  $\eta$  [MPa.s]. W modelach materiałowych do oznaczenia jej stosuje się tłumik lepki Newtona (2 na rys. 1).



1 – sprężyna Hooke'a, 2 – tłumik lepki Newtona

Rys. 1. Oznaczenia elementów składowych modelu lepko-sprężystości oraz odpowiadające tym elementom charakterystyki deformacji podczas obciążenia o stałej wartości i odciążenia.

Jedną z form opisu zachowania się ciał rzeczywistych pod obciążeniem w czasie jest tworzenie ich modeli reologicznych. Modele tworzy się przez różnorodne konfiguracje elementów sprężystych (sprężyn Hooke'a) i lepkich (tłumików Newtona). Z uwagi na fakt, że mieszanki mineralno-asfaltowe są materiałem lepko-sprężystym, poszukuje się takiego połączenia sprężyn Hooke'a i tłumików Newtona, które możliwie najwierniej opisuje faktyczne zachowanie się mma w nawierzchni. Jednym z wielu możliwych modeli jest 4-parametrowy model Burgersa (A na rys. 2) zbudowany z szeregowego połączenia dwóch modeli składowych – Maxwella (opisanego parametrami z indeksem „1”) oraz Kelvina-Voigta (opisanego parametrami z indeksem „2”).



Rys. 2. (a) Schemat modelu Burgersa ciała lepko-sprężystego, (b) odkształcenie modelu podczas trwającego od  $t = 0$  do  $t = t_0$  obciążenia o stałej wartości  $\sigma_0$  wg [4].  $\varepsilon$  – odkształcenie układu,  $\eta_1$  i  $\eta_2$  – lepkości,  $\sigma_0$  – wartość naprężenia przyłożona w czasie  $t=0$ .

J. Judycki w [9] przedstawił wyniki z badań własnych i wnioski na ile poprawnie model Burgersa oddaje faktyczne zachowanie się betonu asfaltowego podczas zginania. Wykazano bardzo dobrą zgodność modelu z wynikami rzeczywistymi w zakresie czasu trwania obciążenia, gorszą przy odciążeniu (w całym badanym zakresie temperatury – od  $-20^\circ\text{C}$  do  $+25^\circ\text{C}$ ).

Podstawowym związkiem między naprężeniem a odkształceniem ciała Burgersa jest równanie stanu, które możemy przedstawić za [3] w postaci konstytutywnego wyrażenia różniczkowego (1) drugiego rzędu:

$$\left[ \frac{d^2}{dt^2} \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} + \frac{d}{dt} \left( \frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_2}{E_2} + \frac{\eta_3}{E_3} \right) + 1 \right] \sigma(t) = \left[ \frac{d^2}{dt^2} \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} + \frac{d}{dt} \eta_1 \right] \varepsilon(t) \quad (1)$$

## Programy do analizy mechanicznej nawierzchni

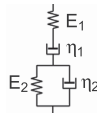
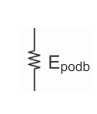

Każdorazowe rozwiązywanie zestawu takich równań jak (1) w układzie wielowarstwowej nawierzchni podatnej jest trudne i czasochłonne. Z pomocą przychodzą jednak programy komputerowe przeznaczone do analizy i obliczeń mechanicznych nawierzchni drogowych. Wśród programów opartych jedynie o sprężyste modelowanie materiałów wyróżnić można między innymi: *BISAR*, *ELSYM*, *ECOROUTE*, *JULEA*, *PDMAP* i *VESYS*. Większe możliwości stoją przed oprogramowaniem opartym o lepko-sprężyste modelowanie materiałów, np. *VEROAD* (wykorzystywanym przez autorów m.in. w tym artykule) oraz *VESYS*. Stosowane są także programy oparte o metodę elementów skończonych (*ABAQUS*, *FENLAP* lub *ILLIPAVE*).

Program *VEROAD*, który został stworzony przez P.C. Hopmana na Uniwersytecie Technicznym w Delft (Holandia) umożliwia modelowanie konstrukcji nawierzchni drogowej w układzie wielowarstwowym (do 16 warstw). Warstwy mogą być wykonane z materiału sprężystego (model Hooke'a) lub lepko-sprężystego (do wyboru liniowy model Burgersa lub model Huet-Sayegh). Obciążenie modeluje się przez podanie parametrów: naprężenia kontaktowego (pionowego i poziomego) na styku opony z nawierzchnią, prędkości ruchu koła oraz wielkości śladu zastępczego koła na nawierzchni. *VEROAD* oferuje możliwość symulacji wpływu ruchu koła na nawierzchnię w siatce trójwymiarowej półprzestrzeni i oblicza w dowolnym punkcie tej półprzestrzeni składowe tensora naprężeń (6 składowych), składowe tensora odkształceń (6 składowych) oraz wektora przemieszczenia (3 składowe). Dodatkowo daje też sposobność wyznaczenia: deformacji trwałych nawierzchni, naprężeń głównych, analiz oddziaływania sumarycznego do 125 pojedynczych kół, obliczeń energii rozproszonej, a także oferuje możliwość przeliczania wartości parametrów modeli warstw konstrukcyjnych nawierzchni.

## Analiza lepko-sprężysta przykładowej nawierzchni

W programie *VEROAD* przyjęto model następującej podatnej konstrukcji nawierzchni:

Tabela 1. Modele warstw konstrukcyjnych nawierzchni oraz ich parametry w zależności od temperatury

Warstwa Grubość	Model / parametry	Temperatura						
		-10°C	0°C	+10°C	+20°C	+30°C	+40°C	
warstwa z betonu asfaltowego, grubości 4 cm	$E_1$ [MPa]	10 501	3 646	1 852	390	162	56	
	$E_2$ [MPa]	3 013	1 110	665	74	35	11	
warstwa z betonu asfaltowego, grubości 6 cm		$\eta_1$ [MPa·s]	30 594 070	4 569 207	1 067 233	269 593	55 674	11 699
		$\eta_2$ [MPa·s]	782 812	321 493	309 365	56 718	35 786	16 242
	$v_{asf}$ [-]	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	
	$E_{podb}$ [MPa]	400	400	400	400	400	400	
podbudowa niezwiązana 20 cm		$v_{podb}$ [-]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	
		$E_{gr}$ [MPa]	50	50	50	50	50	50
podłoże gruntowe		$v_{gr}$ [-]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	

Dane z badań na podstawie [8] Ekstrapolowano na podstawie danych z [8] Parametry przyjęte przez autorów

- 2 warstwy betonu asfaltowego (liniowo lepkosprężyste; model Burgersa)
- podbudowa niezwiązana z kruszywa (warstwa sprężysta; model Hooke'a)
- podłoże gruntowe (modelowane jako półprzestrzeń sprężysta; model Hooke'a).

Układ warstw, ich parametry i grubości przedstawia tabela 1. Parametry reologiczne betonu asfaltowego (w temperaturze od -10°C do +20°C) przyjęto z badań zginania belek przeprowadzonych przez M. Pszczołę [14] w Laboratorium Badań Drogowych na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej. Parametry reologiczne warstw asfaltowych w temperaturze +30°C oraz +40°C, ze względu na brak danych pomiarowych, ekstrapolowano. Parametry sprężyste podbudowy i gruntu podłoża przyjęto według powszechnie stosowanych zasad.

Nawierzchnię obciążono pojedynczym kołem pojazdu poruszającym się z prędkością  $v = 60$  km/h. Naprężenia styczne kontaktowe pominięto. Naprężenie pionowe kontaktowe przyjęto na poziomie  $q = 700$  kPa, natomiast nacisk na pojedyncze koło  $P = 50$  kN.

### Odształcenia spodu warstw asfaltowych

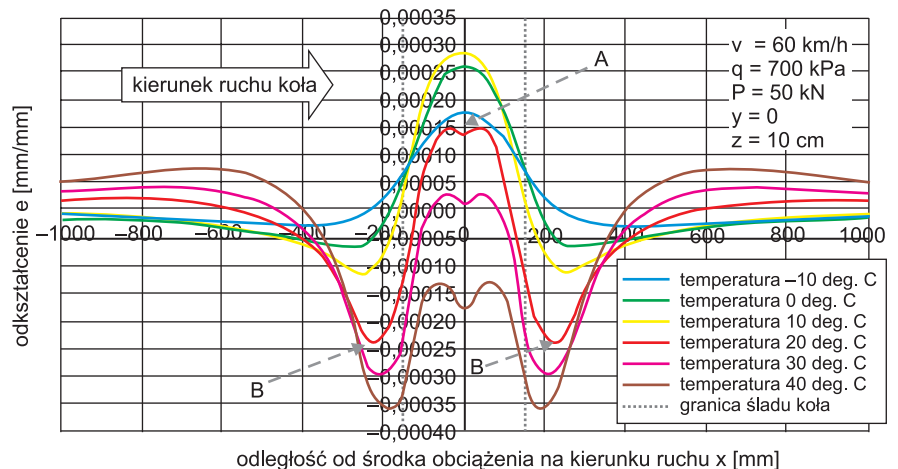
Na rysunku 3 pokazano wyniki obliczeń programem VEROAD przyjętej konstrukcji nawierzchni – odkształcenia  $\varepsilon$  na spodzie warstw asfaltowych ( $z = 10$  cm) na kierunku  $x$  zgodnym z kierunkiem ruchu koła (odkształcenia poziome podłużne) przy różnych wartościach temperatury warstw asfal-

towych w zależności od odległości od środka obciążenia. Na wykresie znak „plus” oznacza odkształcenia rozciągające, a znak „minus” odkształcenia ściskające.

Z analizy rysunku 3 wynika, że pod środkiem obciążenia kołem spód warstw asfaltowych przy ujemnych i umiarkowanych wartościach temperatury ( $< 30^\circ\text{C}$ ) jest rozciągany, a przy dodatniej, wysokiej temperaturze ściskany. W pewnej odległości zaś od tego punktu (uzależnionej również od temperatury) występują zawsze odkształcenia ściskające. Rozciąganie dołem warstw związane jest z ujemną krzywizną czasy deformacji tych warstw

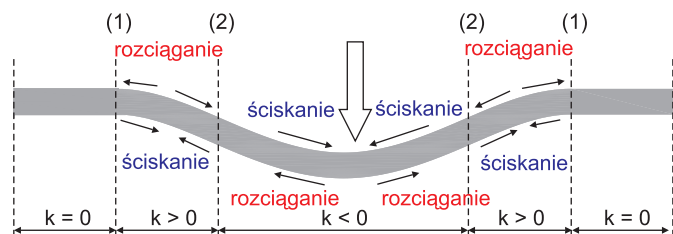
( $k < 0$ ) i analogicznie ściskanie w dolnych partiach wiąże się z krzywizną dodatnią ( $k > 0$ ), jak zilustrowano na rysunku 4.

Przy ujemnej temperaturze i niskich wartościach dodatniej temperatury można przyjąć, że nawierzchnia pracuje w pełni sprężysto. Sztywność warstw asfaltowych jest wówczas duża, co powoduje rozległe ugięcie nawierzchni charakteryzujące się małą krzywizną deformacji pod kołem pojazdu. Wraz ze wzrostem temperatury maleje sztywność (moduł sztywności) warstw asfaltowych i zwiększa się krzywizna deformacji na spodzie warstwy. To generuje wzrost rozciągania w tym rejonie. Rozpatrując dalszy wzrost temperatury warstw asfaltowych do hipotetycznej wartości, przy której warstwa zachowywałaby się czysto plastycznie, nacisk pionowy powodowałby bardzo niewielkie odkształcenia spodu warstw asfaltowych (większość nacisku pionowego zostałaby spożytkowana na deformację i ściskanie materiału w wierzchnich



Rys. 3. Całkowite odkształcenia poziome podłużne na spodzie warstw asfaltowych w przyjętej konstrukcji nawierzchni w różnych temperaturach warstw asfaltowych





Rys. 4. Położenie ściskania i rozciągania na czaszy deformacji warstwy wierzchniej. (1) i (2) – miejsca przegięcia czaszy deformacji (zmiany krzywizny),  $k$  – krzywizna czaszy deformacji



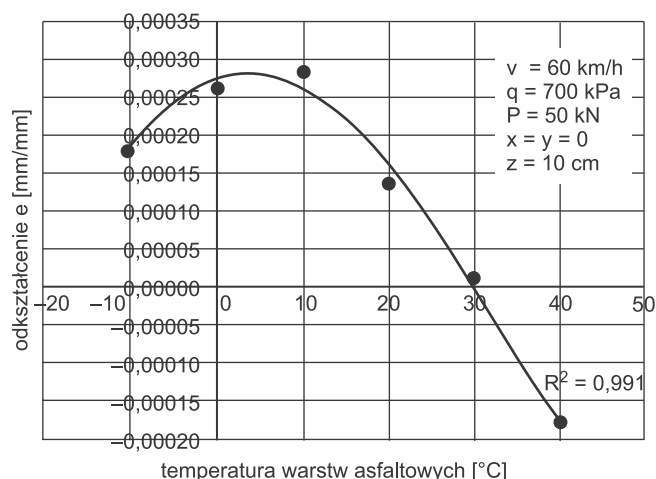
Rys. 5. Deformacje warstw asfaltowych w sytuacjach: (a) pracy czysto sprężystej, (b) pracy lepkosprężystej, (c) hipotetycznej pracy czysto plastycznej nawierzchni

obszarach warstwy), a na jej spodzie mogłoby pojawić się ściskanie, co wykazał także analizowany przypadek.

Największe wartości odkształcenia poziomego występują bezpośrednio pod kołem pojazdu. Odkształcenia te mają charakter rozciągania lub ściskania spodu warstw asfaltowych, w zależności od temperatury warstwy. W temperaturze ujemnej i umiarkowanej dodatniej (tu do  $+30^{\circ}\text{C}$ ), spód warstw z mma jest rozciągany w kierunku poziomym, a w dodatnich, wysokich (powyżej  $+30^{\circ}\text{C}$ ) występuje ściskanie. Wartość rozciągania spodu warstw asfaltowych pod kołem pojazdu jest uzależniona od temperatury tych warstw, przy tym istnieje pewna optymalna jej wartość, przy której rozciąganie jest największe (rys. 6).

W analizowanym przykładzie, gdy temperatura spada od około  $+30^{\circ}\text{C}$  do  $+5^{\circ}\text{C}$  odkształcenia rozciągające występujące na spodzie warstwy asfaltowej pod środkiem obciążenia rosną od zera do maksymalnej wartości, a przy dalszym spadku temperatury poniżej  $+5^{\circ}\text{C}$  wyraźnie maleją. Przy wysokiej temperaturze (tu powyżej  $+30^{\circ}\text{C}$ ) sztywność warstwy asfaltowej jest bardzo mała i nie występuje w niej zginanie tylko wszechstronne ściskanie. Efekt zginania zaczyna występować przy spadku temperatury i rośnie (tu do  $+5^{\circ}\text{C}$ ). Warstwy asfaltowe ulegają wówczas usztywnieniu. Poniżej  $+5^{\circ}\text{C}$  natomiast warstwa asfaltowa jest także zginana, ale jej sztywność staje się bardzo duża wraz ze spadkiem temperatury. Odkształcenia, które są odwrotnie proporcjonalne do sztywności zaczynają spadać.

Wart zwrócenia uwagi jest fakt, że przemieszczające się po nawierzchni obciążenie (na rys. 3 na kierunku osi  $x$ ) powoduje, że odkształcenia spodu warstw asfaltowych zmieniają się w sposób falowy, zgodnie z przebiegiem linii odkształcenia na rysunku 3. Przykładowo w temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$  (linia czerwona na wykresie) ok. 10 cm przed brzegiem śladu koła, na

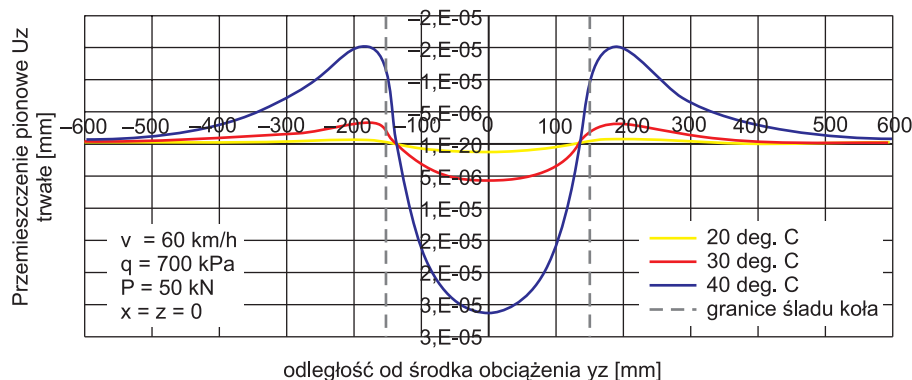


Rys. 6. Zależność odkształcenia poziomego podłużnego na spodzie warstw asfaltowych pod kołem pojazdu w zależności od temperatury

spodzie warstw występują ściskające odkształcenia o wartości  $\varepsilon_x = -0,00024$  (punkt B na rys. 3). W ciągu ok. 0,015 s (przy prędkości ruchu 60 km/h) środek obciążenia znajdzie się nad obserwowanym punktem (sytuacja A z rys. 3). Wówczas na spodzie warstw asfaltowych wystąpi rozciągające odkształcenie o wartości  $\varepsilon_x = +0,00014$  i analogicznie po kolejnych 0,015 s, gdy koło zjedzie z obserwowanego miejsca znów ściskające z sytuacji B. Na długości około 0,5 metra nastąpi zatem dwukrotny skok odkształceń o amplitudzie 0,00038. W tradycyjnym projektowaniu konstrukcji jezdni wyznacza się odkształcenia tylko w środku działania obciążenia i całkowicie pomija się opisany efekt. Wydaje się, że tradycyjne postępowanie jest wyraźnym uproszczeniem.

## Deformacje trwałe nawierzchni

Powodem powstawania deformacji trwałych w nawierzchni (przejawiających się m.in. w postaci kolein) są właściwości lepkie mieszanek mineralno-asfaltowych. Im temperatura ich wyższa, tym lepkość asfaltu zawartego w mma jest mniejsza, a powstające koleiny – większe. Odkształcenia o charakterze lepkim są nieodwracalne. Symulacja przyjętej konstrukcji nawierzchni pozwala ten fakt zaobserwować (rys. 7) w przekro-

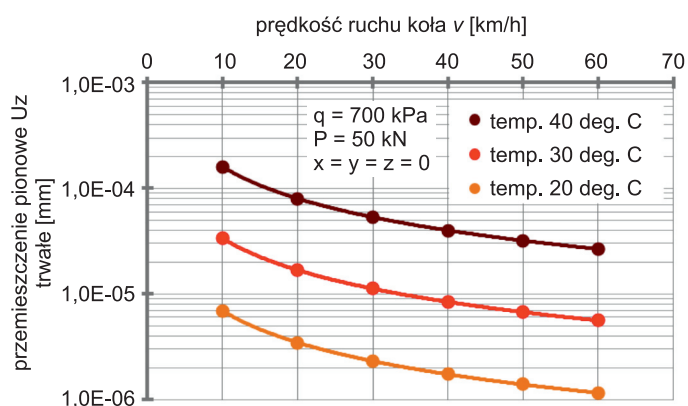


Rys. 7. Trwałe przemieszczenia pionowe na powierzchni warstw nawierzchni w jej przekroju poprzecznym przy różnych wartościach temperatury warstw asfaltowych

ju poprzecznym. Rysunek ten przedstawia przemieszczenia pionowe o charakterze trwałym (nieodwracalne). Sumowanie tych trwałych przemieszczeń od kolejnych obciążeń nawierzchni kołami pojazdów powoduje wystąpienie kolein w nawierzchni.

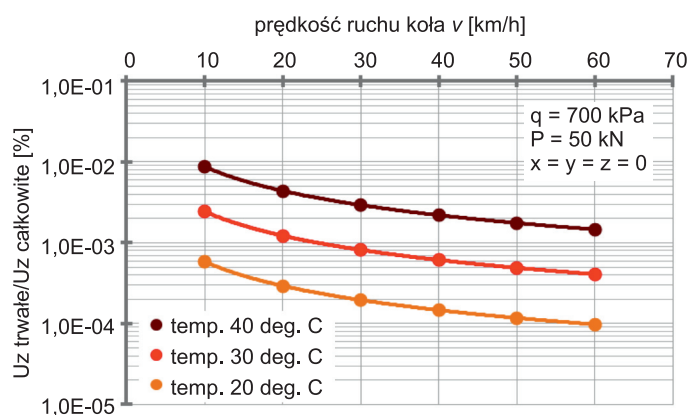
Pod kołem pojazdu następuje ściskanie warstw asfaltowych, natomiast po bokach koła – wypieranie materiału ku górze. Wypieranie związane jest z „wyciskaniem” materiału na boki przez pionowo działające obciążenie. Materiał nie mając gdzie się przemieścić w bok (natrafiając na odpór materiału tam zalegającego) przemieszcza się ku górze, tworząc „garby” po obu stronach koła.

Deformacje trwałe warstw asfaltowych w nawierzchniach oprócz temperatury zależą też od czasu obciążenia, w odróżnieniu od czasowo niezależnych deformacji odwracalnych wynikających z właściwości sprężystych.



Rys. 8. Trwałe przemieszczenia pionowe na powierzchni warstw nawierzchni pod kołem pojazdu w zależności od prędkości jego ruchu przy różnych wartościach temperatury warstw asfaltowych

Fakt zmniejszania się trwałych przemieszczeń pionowych wraz ze wzrostem prędkości spowodowany jest spadkiem sztywności warstwy asfaltowej przy dłuższym czasie trwania obciążenia. Im czas obciążenia jest dłuższy (prędkość mniejsza), tym moduł sztywności warstw asfaltowych jest mniej-



Rys. 9. Stosunek przemieszczenia pionowego trwałego do całkowitego pod kołem pojazdu na powierzchni warstw asfaltowych w zależności od prędkości przy różnych wartościach temperatury warstw asfaltowych

szy, a przyrost deformacji większy. Zjawisko takie może być obserwowane w postaci kolein, np. przed liniami zatrzymania na skrzyżowaniach. W sytuacjach takich czas obciążenia nawierzchni bywa kilka tysięcy razy dłuższy niż podczas ruchu pojazdów.

Deformacje trwałe wraz z deformacjami odwracalnymi (sprężystymi) składają się na deformację całkowitą. Warto zwrócić uwagę jest fakt, że im temperatura jest niższa lub im prędkość jest większa, tym deformacja trwała stanowi mniejszą część deformacji całkowitej występującej w warstwach asfaltowych (rys. 9).

## Podsumowanie

Warstwy asfaltowe w nawierzchniach łączą w sobie zarówno cechy sprężyste, jak i lepkie. Pierwsze z nich dominują przy ujemnych i niskich wartościach dodatniej temperatury i odpowiadają za odwracalne deformacje nawierzchni asfaltowej, drugie zaś występują przy wyższych wartościach temperatury dodatniej i są przyczyną powstawania deformacji trwałych. Modele lepkosprężyste mają tę zaletę, że w temperaturze ujemnej oraz niskiej dodatniej i umiarkowanej opisują zachowanie się nawierzchni podatnej równie dobrze jak model sprężysty, a oprócz tego nadają się doskonale do analiz zachowania się nawierzchni w wyższej, dodatniej temperaturze.

Największym problemem pozostaje kwestia wyznaczenia parametrów reologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych w oparciu o wyniki badań laboratoryjnych. Wciąż niedoskonałe metody badań nie zawsze dają poprawne rezultaty, a same wyniki nie mają uniwersalnego charakteru. Wyznaczone parametry zależą bardzo silnie od sposobu obciążenia badanej próbki, jej geometrii, czasu obciążania i innych czynników. Dlatego należy badania laboratoryjne przeprowadzać w sposób, który możliwie najwierniej będzie odwzorowywał rzeczywistą pracę mma w nawierzchni. Aby móc powszechnie stosować teorię lepkosprężystości w praktyce, należy udoskonalić metody pomiarowe i sposoby wyznaczania tych parametrów mieszanek mineralno-asfaltowych.

O ile wyznaczenie parametrów reologicznych jest problematyczne, o tyle skomplikowanie obliczeń wynikające z analiz wielowarstwowej półprzestrzeni jaką jest konstrukcja nawierzchni drogowej na podłożu gruntowym, nie stanowi obecnie większego problemu. Z pomocą przychodzi oprogramowanie komputerowe. Tym narzędziem można modelować bardzo złożone właściwości i procesy, analizować zachowanie się nawierzchni drogowych w wielu sytuacjach i w różnych warunkach. Zastosowany program VEROAD jest znacznie trudniejszy w zastosowaniu niż powszechnie używany do podobnych celów BISAR. Ponadto praca z tym programem bywa niekiedy długa, a obróbka danych żmudna. VEROAD charakteryzuje się jednak, oprócz podstawowych funkcji (tak jak BISAR), znacznie większym potencjałem obliczeniowym, co przekłada się na większe możliwości analiz pracy warstw asfaltowych w konstrukcjach nawierzchni drogowych.

## Bibliografia

- [1] K. Błażejowski, R. Nilsson, P.C. Hopman, D. Sybilski, *Analiza polskiej typowej nawierzchni podatnej przy zastosowaniu modelu*

- lepkosprężystego i programu VEROAD, 2<sup>nd</sup> International Conference Durable And Safe Road Pavements, Kielce 1996
- [2] H. Borkowski, J. Judycki, *Odporność betonu asfaltowego na spękania w obniżonej temperaturze*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Nr 268, Gdańsk 1984
- [3] H. Borkowski, J. Judycki, *Reologia betonu asfaltowego i konstrukcji nawierzchni*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, nr 406, Gdańsk 1987
- [4] P.C. Hopman, *VEROAD: A viscoelastic multilayer computer program*, Transportation Research Board Business Office, TRB, nr 1539, 1996
- [5] J. Judycki, *Analiza niektórych właściwości reologicznych betonu asfaltowego poddanego działaniu obciążeń statycznych*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1975
- [6] J. Judycki: *Modele reologiczne betonu asfaltowego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Nr 368, Gdańsk 1984
- [7] M. Kalabińska, J. Piłat, *Reologia asfaltów i mas mineralno-asfaltowych*, WKiŁ, Warszawa 1982
- [8] I. Kisiel, B. Lysik, *Zarys reologii gruntów, działanie obciążenia statycznego na grunt*, Arkady, Warszawa 1966
- [9] I. Kisiel, *Reologia w budownictwie*, Arkady, Warszawa 1967
- [10] *Konferencja Naukowa nt. Reologia konstrukcji jezdni i materiałów drogowych*, Instytut Budownictwa Lądowego Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1974
- [11] Ł. Mejłun, *Analiza mechaniczna konstrukcji nawierzchni drogowej w ujęciu teorii lepkosprężystości przy zastosowaniu programu komputerowego VEROAD*. Praca magisterska, Katedra Inżynierii Drogowej, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011
- [12] C.L. Monismith, R.L. Alexander, K.E. Secor, *Rheological Behavior of Asphalt Concrete*, Proc. AAPT, 1966, str. 400-450
- [13] W. Nowacki, *Teoria pełzania*, Warszawa 1963
- [14] M. Pszczoła, *Spękania niskotemperaturowe warstw asfaltowych nawierzchni*. Praca doktorska, Katedra Inżynierii Drogowej, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2006
- [15] M. Reiner, A.G. Ward, *Building Materials Their Elasticity and Inelasticity*, North Holland Publishing Company, Amsterdam, New York 1954
- [16] J. Szczęsna, J. Zawadzki, Charakterystyka krzywej pełzania mieszanek mineralno-asfaltowych, Prace IBDiM, nr 3, 1987
- [17] C. Van der Poel, *Road Asphalt*, Chapter IX w pracy pod redakcją M. Reiner, A.G. Ward, *Building Materials Their Elasticity and Inelasticity*, North Holland Publishing Company, Amsterdam, New York 1954
- [18] J. Zawadzki, Ocena odkształcalności mieszanek mineralno-asfaltowych na podstawie badania pełzania, Prace IBDiM, nr 1, 1985 ■

## Informacja prasowa

### Skanska przebuduje historyczny most przez Wisłę

Skanska podpisała umowę na remont mostu przez rzekę Wisłę w miejscowości Kazuń (woj. mazowieckie). Kontrakt o wartości 6,3 mln zł brutto zrealizuje do grudnia bieżącego roku.

Most kratownicowy w Kazuniu należy do najciekawszych miejsc w okolicach Puszczy Kampinoskiej. Zbudowano go w 1911 r. w ciągu obecnej drogi krajowej nr 85 biegnącej z Nowego Dworu Mazowieckiego (nr 62) do Kazunia (S7). Arteria o długości 4,774 km, leżąca na obszarze województwa mazowieckiego jest najkrótszą drogą



Fot.1. Most im. J. Piłsudskiego w Kazuniu – Katarzyna Janikowska, mostypolskie.pl

krajową w Polsce. Przez liczący ponad pół kilometra most, dawniej przebiegała główna trasa krajowa Warszawa – Gdańsk.

Most został zbudowany częściowo na terenie dawnego Modlina, obecnie dzielnicy Nowego Dworu Mazowieckiego. Był ważnym elementem strategicznym dla twierdzy Modlin.

W 1915 r. wysadzony przez Rosjan, był długo odbudowywany i do pełnej świetności wrócił po gruntownym remoncie w roku 1934. Przetrwiał oblężenie Modlina, ale już pod koniec wojny został ponownie zburzony. W 1952 r. odbudowano go po raz kolejny, dodając pięć przęseł, i w takiej formie zachował się do dzisiaj. Obecny most ma 553 m długości i prawie 12 m szerokości, konstrukcja przęseł wykonana jest ze stalowych parabolicznych kratownic typu „k” z przejezdnością po dolnej części.

W ramach kontraktu odnowione będą zabezpieczenia antykorozyjne konstrukcji stalowej mostu do wysokości 3 m, a także naprawione i wymienione niektóre elementy wyposażenia. Ponadto oczyszczone będą kamienne oblicowania podpór i wykonana powłoka ochronną preparatami hydrofobowymi. W kolejnym etapie odbudowana będzie istniejąca nawierzchnia asfaltowa na dojazdach i moście, chodnikach oraz wykonana izolacja termozgrzewalna.

Dzięki tej przebudowie poprawi się trwałość i estetyka tego historycznego obiektu.

(Wybrał Tadeusz Suwara z informacji prasowej firmy Skanska)