



KRZYSZTOF KOŁODZIEJ

Politechnika Rzeszowska  
krzych@prz.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-2987-6140

# Wpływ lepkości zerowego ścinania asfaltu z dodatkiem asfaltu naturalnego Trinidad Epuré oraz składu mastyksu na odporność na odkształcenia trwałe mieszanki asfaltu lanego

W ostatnich latach asfalt lany (MA) jest mieszanką coraz chętniej stosowaną w nawierzchniach mostowych ze względu na wiele zalet, wśród których można wymienić dobre właściwości hydroizolacyjne, wysoką trwałość zmęczeniową w porównaniu ze standardowymi mieszankami typu beton asfaltowy (AC) lub mastyks grysowy (SMA) [6, 14, 17, 22, 23]. Wadą asfaltu lanego jest mniejsza odporność na odkształcenia trwałe [10, 12, 18]. Na podatność nawierzchni na koleinowanie wpływają głównie właściwości kruszyw i finalnej mieszanki. Istotne są również właściwości lepiszcza. Aby poprawić właściwości asfaltów stosuje się różne dodatki, takie jak: woski, polimery i asfalty naturalne. Wśród tych ostatnich często stosuje się asfalt naturalny Trinidad Epuré (TE). Asfalt ten jest stosowany od wielu lat jako skuteczny modyfikator asfaltu ponaftowego ze względu na jego wysoką kompatybilność, stabilność i trwałość. Z tego względu jest chętnie stosowany jako dodatek do asfaltu lanego przeznaczonego do nawierzchni mostowych. Do najważniejszych zalet stosowania asfaltu naturalnego Trinidad Epuré jako modyfikatora asfaltów należy zaliczyć: poprawę właściwości lepiszcza (utwardzenie lepiszcza i poprawę odporności na starzenie), zwiększenie adhezji, znaczną poprawę urabialności i zagęszczenia mieszanki, a także zwiększenie odporności na odkształcenia trwałe i zmęczenie [8]. Na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na deformacje trwałe duży wpływ mają właściwości lepiszcza modyfikowanego oraz proporcje lepiszcza i wypełniacza [9, 20]. Jedną z właściwości reologicznych lepiszcza, którą można zastosować jako wskaźnik odporności na deformacje trwałe jest lepkość zerowego ścinania (ZSV). Parametr ten został zastosowany przez Sybilskiego [15], a następnie był rozwijany przez wielu innych badaczy [1, 13, 21].

Główną rolą mastyksu w mieszankach mineralno-asfaltowych jest wiązanie grubszych ziaren kruszywa i zapobieganie ich segregacji. Podstawowym parametrem decydującym o właściwościach mastyksu jest jego skład, czyli właściwy dobór proporcji pomiędzy zawartością lepiszcza i wypełniacza [2, 5, 7]. Zawartość lepiszcza w mastyksie nie może być zbyt mała, gdyż prowadziłoby to do jego nadmiernej sztywności i kruchości, co w efekcie czyni nawierzchnię podatną na spękania. Niemniej jednak wraz ze stopniowym wzrostem zawartości lepiszcza nasila się efekt poślizgu lub

smarowania ziarn kruszywa, co prowadzi do zmniejszenia odporności nawierzchni na odkształcenia trwałe. Poglądy na optymalny stosunek wypełniacz/lepiszcze (w/l) w mieszankach mineralno-asfaltowych (głównie betonu asfaltowego) zmieniały się na przestrzeni lat. Początkowo zalecano zakres 0,6–1,2 niezależnie od rodzaju mieszanki. Obecnie zalecenia mówią, że w mieszankach gruboziarnistych nie powinien on przekraczać 1,6, a w mieszankach drobnoziarnistych 1,4 [4, 16]. Skład mastyksu ma decydujący wpływ na wysoką odporność nawierzchni z asfaltu lanego na odkształcenia trwałe [12]. Dlatego określenie optymalnego składu mastyksu (tj. stosunku wypełniacz/lepiszcze) może być podstawą wstępnego etapu projektowania mieszanki asfaltu lanego.

W niniejszej pracy przedstawiono wpływ dwóch parametrów: lepkości zerowego ścinania asfaltu modyfikowanego dodatkiem asfaltu naturalnego Trinidad Epuré w ilości 0%, 10% i 20% masy asfaltu bazowego oraz składu mastyksu opisanego stosunkiem wypełniacz/lepiszcze w zakresie od 3,2 do 4,0 na odporność na odkształcenia trwałe mieszanki asfaltu lanego. Odporność mieszanki asfaltu lanego na odkształcenia trwałe (koleinowanie) oceniono na podstawie statycznego i dynamicznego badania penetracji.

## Materiały

Asfalt drogowy 35/50 jest zalecany przez WT-2 [19] do stosowania w mieszankach asfaltu lanego i dlatego został wybrany jako asfalt bazowy w niniejszym opracowaniu. Ponadto, asfalt 35/50 jest również najpopularniejszym w Polsce asfaltem stosowanym w nawierzchniach drogowych i mostowych. W tabeli 1 zestawiono niektóre z podstawowych właściwości asfaltu 35/50 w stanie pierwotnym (niestarzonym). Modyfikatorem użytym w tym badaniu był asfalt naturalny Trinidad Epuré TE Z 0/8, którego podstawowe właściwości wymieniono w tabeli 2.

Jak można zauważyć, asfalt bazowy użyty w tym badaniu spełniał odpowiednie wymagania normowe. Jednak w przypadku asfaltu naturalnego TE można stwierdzić niewielkie odstępstwa od wymagań. Wynika to z faktu, że dostarczony przez producenta asfalt naturalny został pokryty ziemią okrzemkową (środek zapobiegający sklejanemu się kawałków

Tabela 1. Podstawowe właściwości asfaltu 35/50

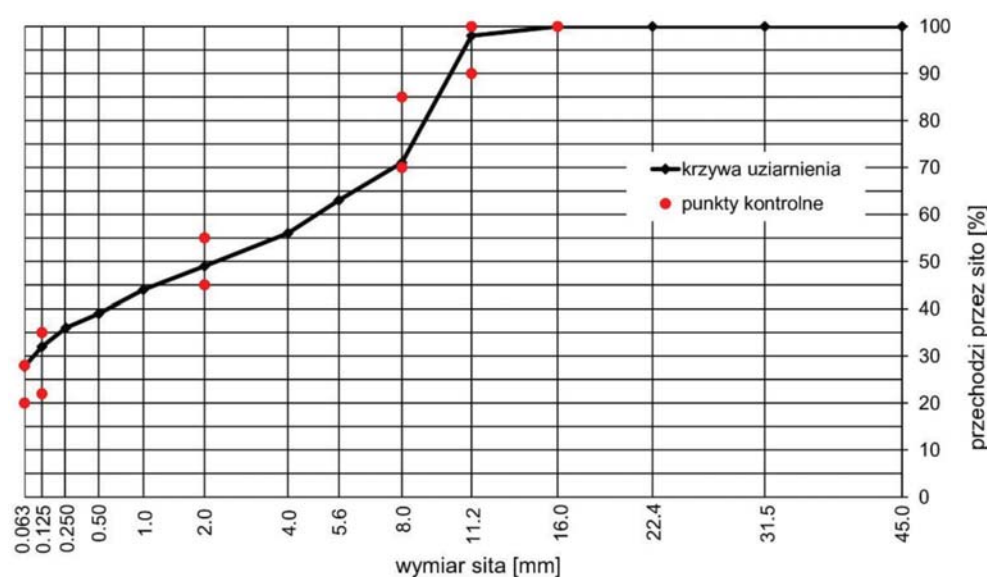
Właściwość	Jednostka	Metoda badania	Wynik	Wymagania wg PN-EN 12591
Penetracja	[ $\times 0,1$ mm]	PN-EN 1426	$42,8 \pm 0,6$	35,0–50,0
Temperatura mięknięcia	[°C]	PN-EN 1427	$55,1 \pm 0,6$	50,0–58,0
Temperatura tamiwości	[°C]	PN-EN 12593	$-13 \pm 1,5$	$\leq -5$
Gęstość w 25°C	[kg/m <sup>3</sup> ]	PN-EN 15326	$1020 \pm 6$	brak wymagań

Tabela 2. Podstawowe właściwości asfaltu naturalnego Trinidad Epuré

Właściwość	Jednostka	Metoda badania	Wynik	Wymagania wg PN-EN 13108-4
Penetracja	[ $\times 0,1$ mm]	PN-EN 1426	$4,0 \pm 0,5$	0,0–4,0
Temperatura mięknięcia	[°C]	PN-EN 1427	$101,2 \pm 1,0$	93,0–99,0
Rozpuszczalność	[% (m/m)]	PN-EN 12592	$57,6 \pm 1,0$	52,0–55,0
Gęstość w 25°C	[kg/m <sup>3</sup> ]	PN-EN 15326	$1380 \pm 8$	1390–1420

asfaltu) i w takiej postaci został dodany do mieszanki. W niniejszej pracy założono, że badania zostaną przeprowadzone na lepiszczu w postaci dostępnej dla odbiorcy. Skład mastyksu, czyli stosunek wypełniacz/lepiszcze, określono na podstawie typowych składów mieszanek mineralno-asfaltowych podanych w polskiej normie [11], ponieważ aktualne wymagania [19] nie zawierają informacji o maksymalnej zawartości lepiszcza w mieszance asfaltu lanego. Ponieważ lepiszcze modyfikowane dodatkiem asfaltu naturalnego TE jest mieszaniną asfaltu i drobnych cząstek mineralnych, ilość wypełniacza została zmniejszona o zawartość cząstek mineralnych pochodzących z asfaltu naturalnego TE, zgodnie z podejściem opisanym w publikacji [3].

Badania odporności na deformacje trwałe wykonano na mieszance MA 11. Mieszanka mineralna asfaltu lanego, której krzywą uziarnienia przedstawiono na rysunku 1, składała się z kruszywa granodiorytowe-



Rysunek 1. Krzywa uziarnienia projektowanej mieszanki asfaltu lanego

go w ilości 45% (kruszywo grube frakcji 4/8 i 8/11), 27% kruszywa o ciągłym uziarnieniu 0/4 i 28% wypełniacza. Przygotowane do badań mieszanki asfaltu lanego zawierały mastyks o stosunku wypełniacz/lepiszcze wynoszącym 3,2, 3,6 i 4,0. Taki skład wynikał z wymagań zawartych w [19], dotyczących zarówno minimalnej zawartości lepiszcza w asfalcie lanym ( $B_{\min} = 7,0\%$ ), jak i maksymalnej zawartości lepiszcza zapewniającej odpowiednią jakość mieszanki asfaltu lanego. Zawartość lepiszcza w badanych mieszankach asfaltu lanego przyjęta na podstawie powyższych założeń stosunku wypełniacz/lepiszcze wahała się od 6,9% (wartość zbliżona do minimalnej zawartości  $B_{\min}$ ), przez 7,7% do maksymalnej wartości 8,7% dla stosunku wypełniacz/lepiszcze odpowiednio 4,0, 3,6 i 3,2.

## Wyniki badań

Lepkość zerowego ścinania wyznaczona dla asfaltu bazowego i modyfikowanego dodatkiem asfaltu naturalnego TE przedstawiono w tabeli 3 w zależności od temperatury badania (40, 50 i 60 °C). Proporcjonalny spadek wartości ZSV można zaobserwować wraz ze wzrostem temperatury

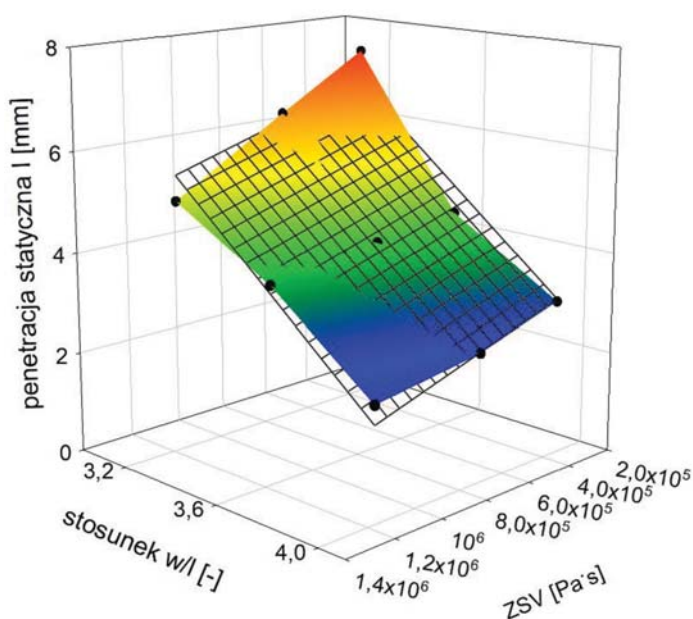
Tabela 3. Lepkość zerowego ścinania asfaltu 35/50 z dodatkiem asfaltu naturalnego TE po starzeniu krótkoterminowym

Dodatek asfaltu naturalnego	ZSV [Pa·s]		
	40°C	50°C	60°C
0% TE	$342\ 650 \pm 35\ 413$	$43\ 690 \pm 4\ 314$	$7\ 703 \pm 239$
10% TE	$710\ 933 \pm 99\ 477$	$78\ 232 \pm 5\ 870$	$13\ 312 \pm 568$
20% TE	$1\ 172\ 167 \pm 60\ 001$	$147\ 400 \pm 5\ 247$	$24\ 572 \pm 747$

i spadkiem zawartości dodatku asfaltu naturalnego. W temperaturze 40°C dwukrotny wzrost ZSV uzyskano dla 10% zawartości asfaltu naturalnego TE i nieco mniej niż trzykrotny wzrost dla 20% dodatku asfaltu naturalnego TE w porównaniu z asfaltem bazowym. W pozostałych temperaturach odpowiednie przyrosty ZSV są mniejsze: 1,7 i 2,5 razy w 50°C oraz 1,6 i 2,4 razy w 60°C, odpowiednio dla 10 i 20% dodatku asfaltu naturalnego TE.

Odporność mieszanki asfaltu lanego na deformacje trwałe była określona w badaniu penetracji statycznej (I) i dynamicznej (ET). Zależność penetracji statycznej od lepkości zerowego ścinania

lepiszcza zmodyfikowanego dodatkiem asfaltu naturalnego TE i stosunku wypełniacz/lepiszczce (w/l) pokazano na rysunku 2. Można zauważyć, że wartość penetracji statycznej jest zależna od tych dwóch parametrów, tj. lepkości zerowego ścinania i stosunku w/l. Większy wpływ na penetrację statyczną mieszanki asfaltu lanego ma skład mastyksu (stosunek w/l) niż właściwości reologiczne lepiszcza (ZSV). Uzyskane wyniki pozwalają również optymalizować skład lepiszcza na podstawie zależności między lepkością zerowego ścinania a zawartością TE (w stosunku do asfaltu bazowego). Można zauważyć, że dobierając określone parametry lepiszcza na podstawie zawartości dodatku asfaltu naturalnego i/lub odpowiedniego składu mastyksu, można poprawić odporność MA na odkształcenia trwałe.



Rysunek 2. Zależność penetracji statycznej od lepkości zerowego ścinania i stosunku w/l

Skład mastyksu ma duży wpływ na penetrację statyczną mieszanki MA. Odporność na odkształcenia trwałe zależy bezpośrednio od sztywności mastyksu, ponieważ ziarna grubego kruszywa są zawieszane w mastyksie i nie mają ze sobą bezpośredniego kontaktu. Zwiększenie stosunku w/l z 3,2 do 4,0 skutkuje zmniejszeniem penetracji statycznej o około połowę. Z drugiej strony, przy stałej wartości stosunku w/l, wzrost dodatku asfaltu naturalnego nie powoduje już tak dużych zmian wartości penetracji. Wzrost wpływu ZSV na odporność asfaltu lanego na deformacje trwałe jest najbardziej widoczny w miękkiej mieszance, tj. o niższym stosunku wypełniacz/lepiszczce. W przypadku mieszanki sztywniejszej, gdzie stosunek w/l wynosi 4,0, zmiana wartości penetracji wraz ze wzrostem ZSV jest mniej widoczna. Różnica w wartościach bezwzględnych wynosi 2,42 i 0,84 mm dla stosunku w/l odpowiednio 3,2 i 4,0. W ujęciu procentowym zmiana ta kształtuje się na porównywalnym poziomie, odpowiednio 32 i 27%.

Zależność między lepkością zerowego ścinania, składem mastyksu a penetracją statyczną, można opisać równaniem liniowym w postaci (1):

$$I = a_1 ZSV + a_2 (w/l) + I_0 \quad (1)$$

gdzie:

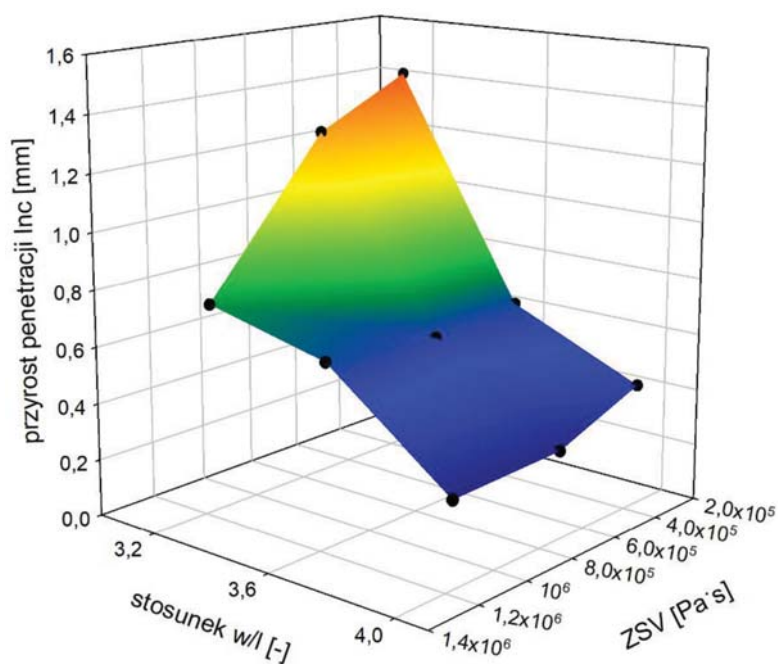
- I – penetracja statyczna [mm];
- $a_1, a_2$  – stałe wyznaczone na podstawie analizy regresji;
- ZSV – lepkość zerowego ścinania [Pa·s];
- (w/l) – stosunek wypełniacz/lepiszczce [-];
- $I_0$  – wyraz wolny.

Dla przyjętych warunków badania (lepiszczce po starzeniu RTFOT, ZSV określone w badaniu oscylacyjnym, penetracja statyczna w temperaturze 40°C) otrzymano wartości następujących współczynników w równaniu liniowym (1):

- $a_1 = -1,524 \times 10^{-6}$ ,
- $a_2 = -4,587$ ,
- $I_0 = 21,993$ .

Za pomocą równania (1) z powyższymi współczynnikami można oszacować penetrację statyczną mieszanki MA, a tym samym odporność na odkształcenia trwałe nawierzchni z asfaltu lanego, począwszy od doboru zawartości dodatku asfaltu naturalnego TE i wyznaczenia lepkości zerowego ścinania tak zmodyfikowanego lepiszcza, a następnie wybrać odpowiedni stosunek w/l czyli odpowiednią ilość lepiszcza w mieszance.

Parametrem, który również może być wykorzystany do oceny odporności MA na odkształcenia trwałe jest przyrost penetracji statycznej ( $I_{nc}$ ) pomiędzy 30 a 60 minutą badania. Penetracja statyczna informuje o wielkości deformacji tylko w jednym punkcie, tj. po określonym czasie, natomiast przyrost penetracji ilustruje te zmiany w czasie. Mieszanki o mniejszym przyroście penetracji będą bardziej odporne



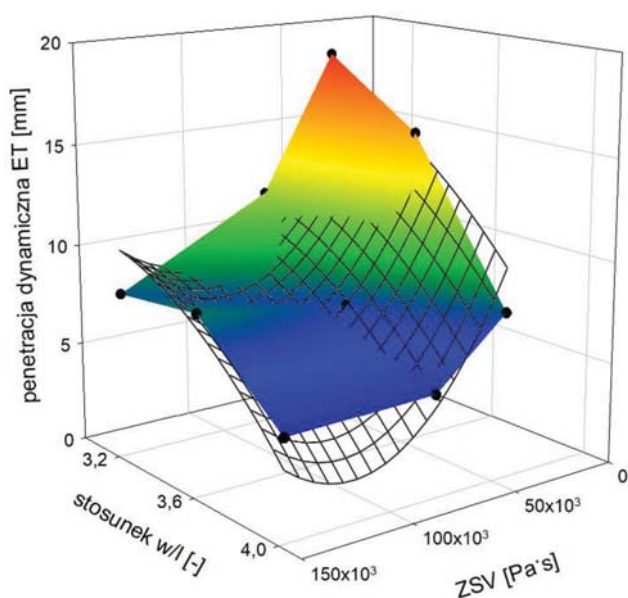
Rysunek 3. Zależność przyrostu penetracji statycznej od lepkości zerowego ścinania i stosunku w/l



na odkształcenia trwałe, ponieważ koleina będzie się rozwijać wolniej niż przy mieszankach o większym przyroście penetracji. Zależność przyrostu penetracji statycznej badanego asfaltu lanego od lepkości zerowego ścinania użytego lepiszcza i stosunku w/l pokazano na rysunku 3.

Na rysunku 3 można zauważyć, że dla mieszanki bez dodatku asfaltu naturalnego TE (tj. o najniższej wartości ZSV) zmiana stosunku w/l z 3,6 na 4,0 skutkuje ponad trzykrotnym zmniejszeniem przyrostu penetracji niż dla mieszanki z dodatkiem 20% TE (tj. najwyższą wartością ZSV), gdzie spadek ten jest tylko 2,5-krotny. Można również zauważyć, że zastosowanie dodatku TE daje najlepsze efekty w przypadku mieszanek miękkich, czyli takich, w których stosunek wypełniacz/lepiszcze jest najmniejszy. Wzrost ZSV skutkuje znacznym spadkiem przyrostu penetracji (o prawie 50%) w porównaniu z mieszanką o stosunku w/l równym 4,0, gdzie spadek ten jest o połowę mniejszy.

W przypadku badania penetracji dynamicznej różnice w wartościach zagłębienia trzpienia dla tej metody badania są większe niż wartości penetracji statycznej (rys. 4).



Rysunek 4. Zależność penetracji dynamicznej od lepkości zerowego ścinania i stosunku w/l

Wynika z tego, że badanie penetracji dynamicznej w większym stopniu różnicuje mieszanki pod względem składu niż metoda statyczna. Jest to widoczne zarówno w przypadku wpływu składu mastyksu, jak i wpływu dodatku asfaltu naturalnego TE. W tym drugim przypadku efekt ten jest bardziej wyraźny w mieszankach miękkich o niskim stosunku wypełniacz/lepiszcze. Zależność penetracji dynamicznej mieszanki asfaltu lanego pokazana na rysunku 4 jest podobna do zależności uzyskanej w badaniu penetracji statycznej. Jedynie w przypadku mieszanki o 20% zawartości asfaltu naturalnego TE i stosunku w/l równym 3,6 mieszanka MA zachowywała się odmiennie od oczekiwań, osiągając wynik penetracji dynamicznej równy 8,76 mm. W badaniu tym zarówno zwiększenie stosunku w/l, jak i zwiększenie wartości ZSV przez dodatek asfaltu naturalnego TE spowodowało utwardzenie mieszanki, co widać po spadku wartości pene-

tracji dynamicznej. Uzyskano blisko 14 mm różnicy pomiędzy skrajnymi wynikami penetracji dynamicznej w porównaniu do nieco ponad 5 mm uzyskanych w badaniu penetracji statycznej.

Zależność między lepkością zerowego ścinania, składem mastyksu a penetracją dynamiczną, można opisać równaniem kwadratowym w postaci (2):

$$ET = a_1 ZSV^2 + a_2 ZSV + a_3 (w/l)^2 + a_4 (w/l) + ET_0, \quad (2)$$

gdzie:

ET – penetracja dynamiczna [mm];

$a_1, a_2, a_3, a_4$  – stałe wyznaczone na podstawie analizy regresji;

ZSV – lepkość zerowego ścinania [Pa·s];

(w/l) – stosunek wypełniacz/lepiszcze [-];

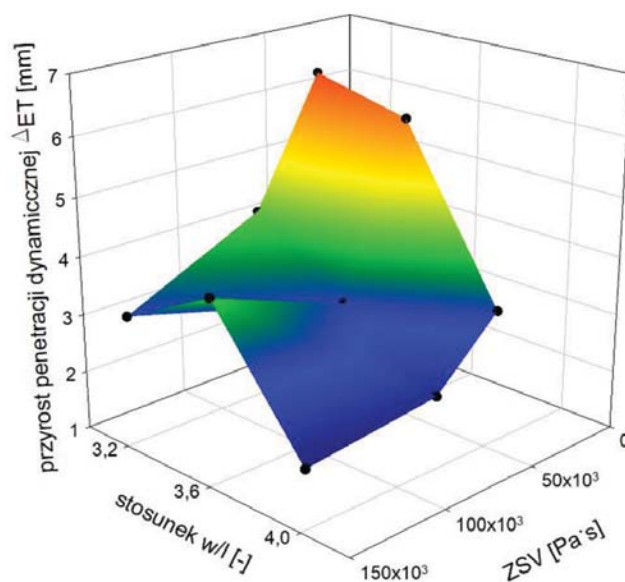
$ET_0$  – wyraz wolny.

Dla przyjętych warunków badania (lepiszcze po starzeniu RTFOT, ZSV określone w badaniu oscylacyjnym, penetracja dynamiczna w temperaturze 50°C) otrzymano wartości następujących współczynników w równaniu kwadratowym (2):

- $a_1 = 1,515 \times 10^{-9}$ ,
- $a_2 = -3,558 \times 10^{-4}$ ,
- $a_3 = -7,479$ ,
- $a_4 = 45,083$ .

Podobnie jak w przypadku penetracji statycznej, równanie (2) o powyższych współczynnikach można wykorzystać do oszacowania penetracji dynamicznej mieszanki asfaltu lanego, a tym samym odporności na odkształcenia trwałe nawierzchni wykonanej z tego materiału.

Podobnie jak w przypadku przyrostu penetracji statycznej, dodatek asfaltu naturalnego TE zmniejsza przyrost penetracji dynamicznej niezależnie od stosunku w/l (rys. 5).



Rysunek 5. Zależność przyrostu penetracji dynamicznej od lepkości zerowego ścinania i stosunku w/l

Zmniejszenie przyrostu penetracji dynamicznej wynosi prawie 50% dla stosunku wypełniacz/lepiszcze równego 3,2 i około 40% dla stosunku w/l równego 4,0. Jest to znacząca różnica w porównaniu do badania statycznego, w którym dla

stosunku  $w/l = 3,2$  dodatek asfaltu naturalnego TE zmniejszył przyrost penetracji na poziomie zbliżonym do badania dynamicznego (około 48%), natomiast dla stosunku  $w/l$  równego 4,0 zmniejszenie przyrostu penetracji statycznej wynosiło 30%.

## Wnioski

Wyniki badań wykazały, że lepkość zerowego ścinania lepszca jest bardzo dobrym miernikiem do oceny odporności mieszanki MA na odkształcenia trwałe. Wysokie współczynniki determinacji  $R^2$  (0,948 dla penetracji statycznej i 0,902 dla penetracji dynamicznej) dla obu zależności (1) i (2) wykazały duży wpływ ZSV na wyniki badania penetracji statycznej i dynamicznej. Zwiększenie lepkości lepszca poprzez dodanie modyfikatora w postaci asfaltu naturalnego TE pozytywnie wpływa na odporność mieszanki MA na odkształcenia trwałe. Poprawa ta jest widoczna zarówno w uzyskiwanych wartościach penetracji, jak i przy przyroście penetracji.

Oceniając wpływ ZSV na odporność na odkształcenia trwałe należy wziąć pod uwagę skład mieszanki MA. Pozytywne efekty uzyskane dla wysokiej wartości ZSV są najbardziej widoczne w przypadku mieszanki o niskim współczynniku  $w/l$ , gdzie lepszca ma większy wpływ na odporność na odkształcenia. Gdy stosunek  $w/l$  wzrasta wraz ze wzrostem zawartości wypełniacza, a więc mieszanka MA jest wystarczająco sztywna, wpływ ZSV na odporność na odkształcenia trwałe nie jest tak bardzo widoczny. Niezależnie od składu uwidacznia się pozytywne działanie lepszca modyfikowanego dodatkiem asfaltu naturalnego TE, a zwiększenie lepkości lepszca przez ten dodatek poprawia odporność na odkształcenia mieszanki MA. Stopień poprawy zależy jednak od składu mieszanki.

Zarówno w przypadku badań statycznych, jak i dynamicznych można wskazać minimalną wartość ZSV, powyżej której następuje istotna zmiana odporności mieszanki MA na odkształcenia trwałe. Zaobserwowano, że minimalna wartość ZSV gwarantująca odpowiednią odporność wynosi odpowiednio 700 i 800 kPa·s, odpowiednio dla temperatury 40 i 50 °C. W przypadku badania penetracji statycznej jest to widoczne w przyroście penetracji (zwłaszcza gdy współczynnik  $w/l$  wynosi 3,2) i mniej widoczne w samej penetracji. W przypadku badania dynamicznego poprawa odporności na odkształcenia trwałe jest widoczna zarówno w samej penetracji, jak i w przyroście penetracji.

## Bibliografia

- [1] Adnan, A.M.; Lü, C.; Luo, X.; Wang, J. Impact of Graphene Oxide on Zero Shear Viscosity, Fatigue Life and Low-Temperature Properties of Asphalt Binder. *Materials* 2021, nr 14, s. 3073.
- [2] Cao, L. Experiment Research of Filler-Bitumen Ratio Impact on Asphalt Mixture Performance. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, nr 361–363, s. 1851–1856.
- [3] Carl Ungewitter Trinidad Lake Asphalt GmbH & Co. *Laborhandbuch für Trinidad Naturasphalt*; Carl Ungewitter Trinidad Lake Asphalt GmbH & Co.: Brema, Germany, 2013.
- [4] FHWA. *Superpave Fundamentals Reference Manual*; FHWA: Washington, DC, USA, 2000.
- [5] Judycki, J. Niewłaściwe proporcje “wypełniacz-asfalt” w betonie asfaltowym możliwą przyczyną uszkodzeń nawierzchni. *Drogownictwo* 2007, nr 10, s. 311–313
- [6] Kołodziej K., Bichajło L., Siwowski T., : Asfalt lany w nawierzchni drogowych obiektów mostowych, *Drogownictwo* 2022, nr 5, s. 146-153.
- [7] Lebedev, M.S.; Kozhukhova, N.I. Rheological characteristics of bitumen mastic depending on composition and filler dispersity. *Journal of Physics: Conference Series - IOPscience* 2018, nr 1045.
- [8] Li, R.; Wang, P.; Xue, B.; Pei, J. Experimental study on aging properties and modification mechanism of Trinidad lake asphalt modified bitumen. *Construction and Building Materials* 2015, nr 101, s. 878–883.
- [9] Luo, S.; Lu, Q.; Qian, Z.; Wang, H.; Huang, Y. Laboratory investigation and numerical simulation of the rutting performance of double-layer surfacing structure for steel bridge decks. *Construction and Building Materials* 2017, nr 144, s. 178–187.
- [10] Luo, S.; Qian, Z.; Yang, X.; Wang, H. Design of gussasphalt mixtures based on performance of gussasphalt binders, mastics and mixtures. *Construction and Building Materials*. 2015, nr 156, s. 131–141.
- [11] PN-S 96025:2000. *Drogi Samochodowe i Lotniskowe–Nawierzchnie Asfaltowe–Wymagania*; PKN: Warszawa, Polska, 2000.
- [12] Pokorski, P.; Radziszewski, P.; Sarnowski, M. Fatigue life of asphalt pavements on bridge decks. *Procedia Engineering*. 2016, nr 153, s. 556–562.
- [13] Qasim, Z.I.; Abed, A.H.; Almomen, K.A. Evaluation of Mixing and Compaction Temperatures (MCT) for modified asphalt binders using zero shear viscosity and Cross-Williamson model. *Case Studies in Construction Materials*. 2019, nr 11
- [14] Radziszewski, P.; Piłat, J.; Sarnowski, M.; Kowalski, K.; Król, J. Influence of high temperature on properties of materials used in bridge asphalt pavement structures. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*. 2015, nr 14, s. 175–191.
- [15] Sybilski, D. Zero-shear viscosity of bituminous binder and its relation to bituminous mixture's rutting resistance. *Transportation Research Record* 1996, nr 1535, s. 15–21.
- [16] Teng, T.P. *Superpave Mixture Design Guide*; FHWA: Washington, DC, USA, 2001.
- [17] Wang, M.; Hu, D.; Xiao, L.; Shang, F. Developments of Gussasphalt System on Steel Deck Pavement. *World Journal of Engineering Research and Technology* 2017, nr 5, s. 141–147
- [18] Widyatmoko, I. Damages of Orthotropic Bridge Deck Surfacing: Forensic Investigation, Remedial Work and Performance Monitoring. *J. Kejuruter*. 2021, nr 33, s. 281–291.
- [19] Załącznik do zarządzenia nr 54 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad. *Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. WT-2 2014–Część. I. Mieszanki mineralno-asfaltowe; Wymagania Techniczne*; Warszawa, 2014
- [20] Xin, C.; Lu, Q.; Ai, C.; Rahman, A.; Qiu, Y. Optimization of hard modified asphalt formula for gussasphalt based on uniform experimental design, *Construction and Building Materials*, 2017, nr 136, s. 556–564.
- [21] Zhang, H.; Chen, Z.; Xu, G.; Shi, C. Evaluation of aging behaviors of asphalt binders through different rheological indices. *Fuel* 2018, nr 221, s. 78–88.
- [22] Zou, G.; Xu, X.; Li, J.; Yu, H.; Wang, C.; Sun, J. The effects of bituminous binder on the performance of gussasphalt concrete for bridge deck pavement. *Materials* 2020, nr 13, s. 364.
- [23] Zou, G.; Zhang, X.; Wu, C. Experimental method of fatigue performance of mastic asphalt for bridge deck pavement. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2019, nr 14, s. 568–586.