

**Rys. 15.** Szczegóły modelu numerycznego i rozkłady naprężeń uzyskane w trakcie symulacji komputerowej

mościach z wytrzymałości materiałów, a wyniki można później porównać z wartościami ustalonymi w programie komputerowym.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Kleiber M. (red), Handbook of computational solid mechanics. Springer-verlag, Berlin 1998
- [2] Kleiber M., Modelowanie i symulacja komputerowa – moda czy naturalny trend rozwoju nauki. Nauka, 1999, 4, 29–41
- [3] Sikora J., Numeryczne metody rozwiązywania zagadnień brzegowych. Podstawy metody elementów skończonych i metody elementów brzegowych. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2011
- [4] Wodecki J., Badanie wytrzymałości ostrza noża tokarskiego przy użyciu metody elementów skończonych. Modelowanie Inżynierskie, 2007, 33, 159–166

[5] Górski R., Analiza modalna wzmocnionych tarcz metodą elementów brzegowych. Modelowanie Inżynierskie, 2008, 35, 31–38

[6] Dong-o J., Compact finite difference method for calculating magnetic field components of cyclotrons. Journal of Computational Physics, 1997, 132, 167–174

[7] Kamiński M., Stochastic perturbation approach to engineering structure vibrations by the finite difference method. Journal of Sound and Vibration, 2002, 251, 651–670

[8] Arluri S. N., Zhu T., New concepts in meshless methods. International Journal For Numerical Methods In Engineering, 2000, 47, 537–556

[9] Ossowski R., Metody bezsiatkowe – nowe perspektywy zastosowania w geoinżynierii. Część II. Rozwiązanie zagadnienia Flamanta z zastosowaniem metody MLPG. Inżynieria Morska i Geotechnika, 2006, 6, 358–362

[10] Golewski P., Golewski G. L., Przykłady zastosowania programu Solidworks w obliczeniach inżynierskich MES. Materiały Budowlane, 2008,12, 3–6

[11] Golewski G. L., Konstrukcja żelbetowego garażu naziemnego obliczanego jako ustrój płytowo-słupowy MES. Drogownictwo, 2011, 6, 204–208

[12] Korga S., Wykorzystanie programu Solidworks do modelowania przedmiotów na przykładzie wieszaka na ubrania. Postępy Nauki i Techniki, 2009, 3, 108–117

[13] Golewski P., Golewski G. L., Numeryczne modelowanie pracy sprężonych stropowych płyt kanałowych z otworami. Materiały Budowlane, 2011, 5, 18–21

[14] Oleszek G., Projektowanie 2D/3D w T-FLEX Parametric CAD 9.0. Design News, 2005, 10, 24–25

[15] Golewski G., Sadowski T., Ocena uszkodzeń betonu przy ścinaniu na podstawie badań kompozytów z kruszywami granitowymi. Przegląd Budowlany, 2007, 3, 21–25

[16] Komorzycki C., Golewski P., Sadowski T., Zadania z podstaw kształtowania elementów konstrukcji. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej. Lublin 2011

# Nawierzchnie asfaltowe z dodatkiem asfaltu naturalnego Trinidad Epuré

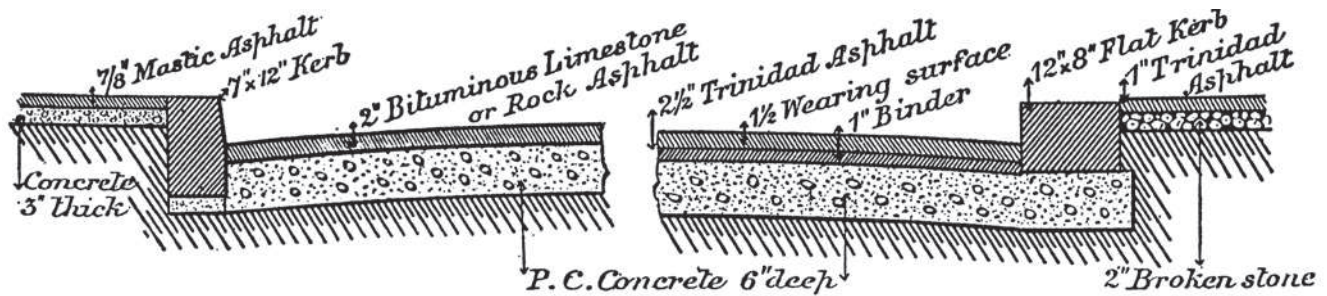
Prof. dr hab. inż. Wojciech Grabowski, dr inż. Mieczysław Słowik, Politechnika Poznańska

## 1. Wprowadzenie

Trynidad Epuré, asfalt naturalny, pochodzi ze złoża zwanego Trynidad Asphalt Lake, które znajduje się na wyspie Trynidad, położonej na morzu Karaibskim u wybrzeży Wenezueli. Materiał ten, odspojony z powierzchni jeziora asfaltowego zawiera naturalną mieszaninę: asfaltu – 39,3%, składników mineralnych – 27,2%, wody i substancji lotnych – 29,0 do 30,2% oraz wody związanej – 3,3% [1]. Po oczyszczeniu uzyskuje się asfalt o nazwie Trynidad Epuré (TE) charakteryzujący się następującym składem: lepiszcze asfal-

towe – od 53 do 55%, składniki mineralne – od 36 do 37%, nierozpuszczalne w CS<sub>2</sub> substancje organiczne – od 9,0 do 10,0%.

Pierwsze praktyczne zastosowania asfaltu naturalnego Trynidad Epuré miały miejsce w 1815 roku, kiedy użyto go do budowy nawierzchni ulic stolicy Trynidadu Port of Spain, a następnie w New Jersey oraz na odcinku Piątej Alei w Nowym Jorku [2]. Bezpośrednie zastosowanie asfaltu naturalnego Trynidad Epuré zakończyło się sukcesem, dzięki unikalnemu składowi tego tworzywa, zawartości około 36% drobnych pyłów mineralnych tworzących z asfaltem kompozyt mineralno-asfaltowy – rysunek 1. Pyły zawar-



Rys. 1. Typowe przekroje poprzeczne nawierzchni ulic z 1895 roku z zastosowaniem asfaltu Trinidad [4]

te w asfalcie naturalnym składają się z ziaren < 0,09 mm w ilości około 82% oraz ziaren 0,09–0,25 mm w ilości około 18%. W XX wieku najliczniejsze zastosowania asfaltu Trinidad Epuré miały miejsce w Niemczech do wykonania nawierzchni z asfaltu lanego. Na podstawie wieloletnich doświadczeń udokumentowano korzystny wpływ dodatku asfaltu naturalnego do mieszanek mineralno-asfaltowych na ich urabialność i zagęszczalność, a prace prof. Aranda z 1990 roku potwierdziły te korzystne cechy [3]. Trinidad Epuré zawiera wodę związaną, którą można częściowo uwolnić w temperaturze powyżej 150°C. Uwolnienie wody związanej, zawartej w asfalcie naturalnym, podczas procesu technologicznego produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych, powoduje zwiększenie urabialności mieszanki i w konsekwencji podatności na zagęszczanie w nawierzchni drogowej. W 2007 roku w Niemczech zastosowano z powodzeniem dodatek asfaltu naturalnego do cienkich dywaników na gorąco, na wielu odcinkach nawierzchni poddanych zabiegom remontowym. Celem zastosowania tego dodatku było stworzenie korzystniejszych warunków zagęszczania cienkiej warstwy, która ulega szybkiemu ochłodzeniu podczas pracy walców i działania czynników atmosferycznych.

## 2. Cel i zakres pracy

Zakres poznawczy pracy obejmuje dwa cele: analityczny oraz technologiczny. Celem analitycznym jest

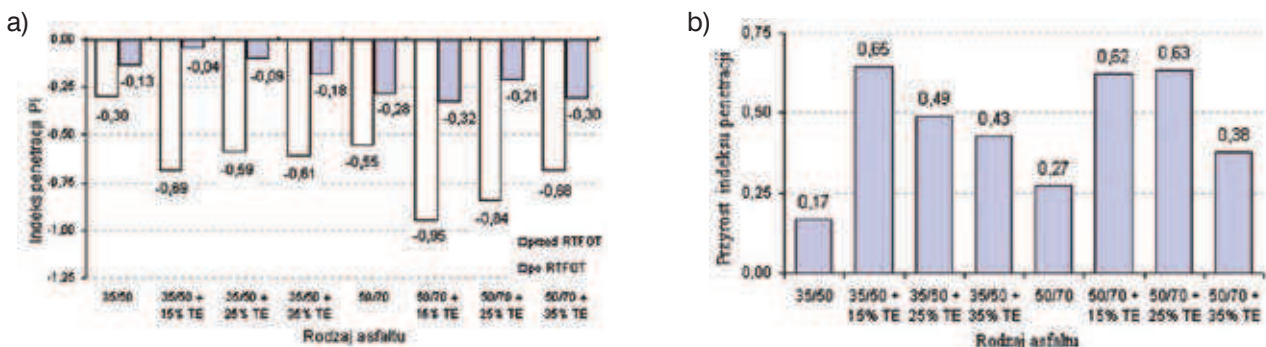
poznanie wpływu dodatku asfaltu naturalnego Trinidad Epuré (TE) na zmiany właściwości reologicznych, a w szczególności polepszenie cech użytkowych dwóch polskich asfaltów drogowych gatunku 35/50 i 50/70, powszechnie stosowanych do warstw ścieralnych, wiążących, a także warstw podbudowy nawierzchni asfaltowych. Cel technologiczny stanowi weryfikacja dostępnej wiedzy związanej z poprawą właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych zawierających dodatek TE w zakresie zagęszczalności, przyczepności asfaltu do powierzchni kruszywa oraz odporności na starzenie.

## 3. Rezultaty badań laboratoryjnych asfaltów drogowych modyfikowanych dodatkiem TE

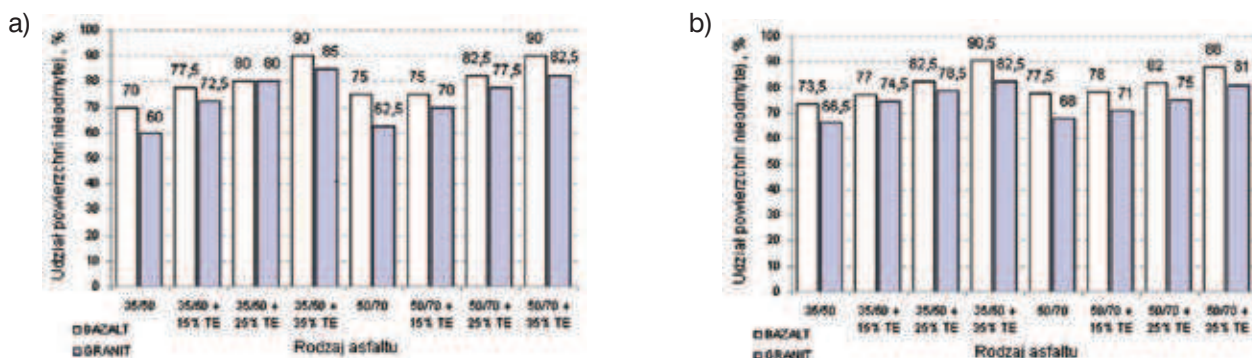
Badaniom poddano 2 zbiory kompozytów – z udziałem asfaltu 35/50 oraz 50/70, każdy z dodatkiem odpowiednio 15, 25 i 35% asfaltu TE i oznaczono (przykładowo): 35/50 + 15% TE.

### 3.1. Wrażliwość termiczna

Wartości indeksu penetracji badanych kompozytów, jako miary ich wrażliwości termicznej oraz wartości przyrostu indeksu penetracji w wyniku starzenia symulowanego metodą RTFOT, zamieszczono na rysunku 2. Do obliczenia indeksu penetracji wykorzystano wyniki oznaczenia penetracji w temperaturze 25°C oraz tem-



Rys. 2. Indeks penetracji badanych lepisczy: a) wartości; b) przyrost po starzeniu RTFOT



Rys. 3. Udział powierzchni nieodmytej z asfaltu na kruszywie bazaltowym i granitowym: a) metoda wizualna; b) metoda komputerowa

peratury mięknięcia wg PiK, przed i po starzeniu metodą RTFOT [5].

### 3.2. Przyczepność lepiszczy do powierzchni kruszyw

Właściwości lepiszcza asfaltowego decydujące o przyczepności do kruszywa są ściśle związane z pochodzeniem materiału wyjściowego użytego do jego produkcji, czyli ropy naftowej, metody produkcji oraz konsystencji. W ujęciu fizyczno-chemicznym zagadnienie kontaktu ciał: lepiszcze – materiał mineralny jest związane ze zdolnością zwilżania powierzchni ciała stałego przez asfalt. Zdolność ta zależy przede wszystkim od lepkości zwilżającego lepiszcza i jego napięcia powierzchniowego [6].

Przyczepność asfaltu do kruszywa oceniono na podstawie wyników testu gotowania przeprowadzonego zgodnie z normą PN-B-06714-22. W badaniu użyto dwa rodzaje kruszywa: bazaltowe i granitowe. W celu uzyskania pomiaru o większej dokładności, w porównaniu z metodą normową, dokonano również oceny „komputerowej” polegającej na przekształceniu obrazu cyfrowego powierzchni próbki, programem graficznym, na obraz binarny, czyli obraz charakteryzujący się dwoma kolorami: czarnym i białym. Kolor czarny dotyczy powierzchni pokrytej asfaltem, a kolor biały powierzchni kruszywa odmytej z asfaltu. Do obliczenia pola powierzchni kruszywa pokrytego asfaltem oraz

pola powierzchni całej próbki użyto specjalnego programu komputerowego, co skutkowało uzyskaniem większej dokładności niż przy ocenie wizualnej. Badania przeprowadzono na każdym rodzaju próbek laboratoryjnych kruszywa, a jako wynik przyjęto średnią arytmetyczną z dwóch obserwacji. Wyniki obliczeń powierzchni kruszywa nieodmytej z asfaltu w wyniku testu gotowania przedstawiono na rysunku 3.

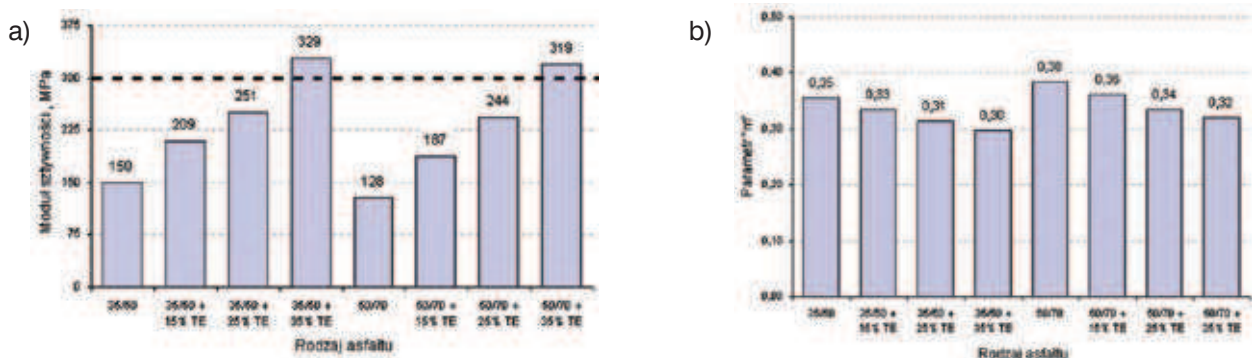
### 3.3. Zachowanie w niskiej temperaturze

Badanie przeprowadzono w reometrze zginanej belki BBR w temperaturze -16°C zgodnie z normą PN-EN 14771. Oznaczono wartości modułu sztywności  $S_m(t)$  oraz parametru „m” – stosunku logarytmu modułu sztywności  $S_m(t)$  do logarytmu czasu  $t$  działania obciążenia. Rezultaty zestawiono na rysunku 4.

## 4. Analiza i dyskusja rezultatów

Na podstawie wykresu przedstawionego na rysunku 2 można zauważyć, że przyrosty indeksu penetracji w wyniku starzenia metodą RTFOT w przypadku asfaltów z dodatkiem TE są znacząco większe w porównaniu do asfaltów wyjściowych co należy uznać jako korzystne dla zastosowań w nawierzchni drogowej.

Rezultaty badań zamieszczone na rysunku 3 wykazały, że w przypadku zastosowania dodatku 35% TE,



Rys. 4. Wyniki badań próbek asfaltów w reometrze BBR w temperaturze -16°C: a) moduł sztywności; b) parametr „m”





**Rys. 5.** Wykonanie warstwy asfaltu twardolanego: a) mechaniczna układarka przygotowana do pracy; b) układanie i uszorstnianie powierzchni

do obu asfaltów drogowych, powierzchnia kruszywa granitowego nieodmyta z asfaltu przekracza wartość 80% całkowitej powierzchni kruszywa. Rezultat ten mógłby być podstawą do użycia kruszywa granitowego bez zastosowania środków adhezyjnych. Świadczy to o bardzo istotnym, korzystnym wpływie dodatku TE na przyczepność asfaltu do powierzchni kruszyw kwaśnych.

Analizując wyniki badań uzyskanych w reometrze zginanej belki BBR w temperaturze  $-16^{\circ}\text{C}$  stwierdzono, że dodatek TE do asfaltów drogowych 35/50 i 50/70 powoduje wprost proporcjonalny wzrost modułu sztywności w funkcji zawartości TE – rysunek 4. Przeprowadzona na rysunku 4a) linia, oznaczająca wartość modułu sztywności równą 300 MPa wskazuje, że dodatek 35% TE zarówno dla asfaltu drogowego 35/50, jak i 50/70 powoduje zbyt duże usztywnienie kompozytu w temperaturze  $-16^{\circ}\text{C}$ , co może skutkować dużą wrażliwością na pęknięcia niskotemperaturowe. Wraz ze wzrostem zawartości dodatku TE maleje wartość parametru „m”. Zgodnie z zaleceniami [7] wartość parametru „m” nie powinna być mniejsza niż 0,3, rezultaty badań wszystkich próbek przedstawione na rysunku 4b), spełniają powyższy wymóg. Można stwierdzić, że dodatek 35% TE do asfaltu 35/50 jest zbyt duży z punktu widzenia nadmiernego usztywnienia w niskiej temperaturze.

## 5. Praktyczne zastosowanie dodatku TE do asfaltu twardolanego

Jedno z pierwszych zastosowań asfaltu twardolanego modyfikowanego dodatkiem TE miało miejsce w 2010 roku na nowej drodze rowerowej w województwie wielkopolskim. Dotychczas dodatek TE stosowano w Polsce najczęściej do modyfikacji asfaltów drogowych przy wykonaniu mieszanki asfaltu lanego układanego

ręcznie. Metoda ta znajduje bardzo szerokie zastosowanie przy naprawach i remontach nawierzchni ulic. Technologia asfaltu twardolanego stanowi postęp w tej dziedzinie dzięki zastosowaniu mechanicznego układania warstwy asfaltowej. Na rysunku 5 przedstawiono fotografie wykonane podczas układania warstwy asfaltu twardolanego na drodze rowerowej. Użyto wówczas mieszankę asfaltu twardolanego o uziarnieniu 0–11 mm, w której szkielet mineralny stanowiły grysy bazaltowe, a optymalną zawartość wagową lepiszcza asfaltowego w mieszance mineralno-asfaltowej (MMA) określono na 7,2%. Na całkowitą ilość lepiszcza w MMA przypadają: 6,2% asfaltu 35/50 oraz 1,0% lepiszcza (bez części mineralnych) z asfaltu naturalnego Trinidad Epuré. Badania laboratoryjne użytej mieszanki asfaltu twardolanego wykazały dobre właściwości mechaniczne charakteryzowane wartością penetracji (po 30 min obciążenia) – 2,1 mm (wymagany przedział: od 1,0 do 3,5 mm) oraz przyrostem wartości penetracji (po kolejnych 30 min obciążenia) – 0,3 mm (wymagane:  $\leq 0,4$  mm).

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Laborhandbuch für Trinidad Naturasphalt, Trinidad Lake Asphalt GmbH & Co. KG, Brema 2007
- [2] Grabowski W., Struktura a właściwości funkcjonalne wypełniaczy mineralnych stosowanych w drogownictwie, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007
- [3] Danowski M., Nawierzchnie z dodatkiem asfaltu naturalnego Trinidad, Nawierzchnie Asfaltowe, 2/2009
- [4] Trinidad Lake Asphalt, Lake Asphalt of Trinidad & Tobago (1978) Ltd, Brighton, La Brea, Trinidad, West Indies
- [5] Grabowski W., Słowik M., Bilski M., Ocena wpływu dodatku asfaltu naturalnego Trinidad Epuré na wybrane właściwości asfaltów drogowych, 56 Konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZiTb, Krynica 2010, s. 279–286
- [6] Jaskuła P., Niszczące działanie wody i mrozu na mieszanki mineralno-asfaltowe – przegląd literatury, Drogi i Mosty 4/2004, s. 8–12, 23, 24
- [7] Piłat J., Radziszewski P., Nawierzchnie asfaltowe, WKiŁ, Warszawa 2004