

*Budownictwo i Architektura 1 (2007) 45-56*

## **Trwałość podbudów z mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MMCE)**

**Jerzy Kukielka**

*Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej,  
Katedra Budownictwa Drogowego, e-mail: [jerzy.kukielak@pollub.pl](mailto:jerzy.kukielak@pollub.pl)*

**Streszczenie:** Technologia recyklingu na zimno z zastosowaniem mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych polega na frezowaniu zniszczonych drogowych warstw asfaltowych i wymieszaniu uzyskanego rozdrobnionego materiału, zwanego destruktem, z kruszywem łamanym, cementem i emulsją asfaltową w urządzeniach stacjonarnych lub na wykonaniu wszystkich czynności technologicznych na miejscu z zastosowaniem np. recyklera. Celem pracy było ustalenie czynników mających wpływ na trwałość podbudów z MMCE, które osiągnięto poprzez realizację celów szczegółowych takich jak m.in.: opisanie struktury MMCE, ocenę wpływu temperatury na wytrzymałość i odkształcalność próbek z MMCE, ustalenie własności reologicznych przez określenie zespolonego modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego, ocenę trwałości zmęczeniowej próbek MMCE, ocenę odporności na pękanie niskotemperaturowe (TSRST) oraz analizę wyników badań terenowych (FWD, belka Benkelmana). Rezultatem pracy jest aplikacja wyników badań do wymiarowania konstrukcji nawierzchni o podbudowie z MMCE.

**Słowa kluczowe:** Mieszanka mineralno-cementowo-emulsyjna, recykling, podbudowa, trwałość.

### **1. Wprowadzenie**

W niniejszej pracy sformułowano następujące tezy:

- doświadczenia praktyczne z wykonanych „in situ” podbudów MMCE w województwie lubelskim, podkarpackim i innych regionów Polski pozwalają stwierdzić, że dodatek kruszywa doziarniającego wynoszący często 50%, cementu 5% i emulsji asfaltowej 3% stosowany w celu uzyskania wymaganej stabilności, może być powodem relatywnie dużej początkowej sztywności podbudowy,
- ważnym czynnikiem wpływającym na trwałość podbudowy MMCE jest skład granulometryczny, zwłaszcza doziarniającego kruszywa łamanego, którego najgrubsze frakcje tylko częściowo związane są z matrycą asfaltowo-cementową. Do zwiększenia trwałości i jednorodności podbudów z MMCE uzasadnione jest doziarnienie destruktu kruszywem łamanym o uziarnieniu do 25 mm lub do 16 mm pod warunkiem zwiększenia dodatku cementu do 5% i ograniczenia dodatku emulsji asfaltowej do 3%, gdy zawartość starego asfaltu w destrukcie  $\leq 8\%$ ,

- zwiększenie dodatku cementu do 5% ponad zalecane 4% (w celu uzyskania wymaganej stabilności) nie wpływa niekorzystnie na właściwości niskotemperaturowe mieszanki MMCE.

Cele szczegółowe pracy:

- wykonanie badań wstępnych próbek z mieszanek o krzywych uziarnienia przebiegających przy górnej i dolnej granicy dobrego uziarnienia w celu wybrania składu MMCE do dalszych szczegółowych badań, umożliwiających kompleksową ocenę ich trwałości,
- ocena struktury MMCE na podstawie wybranych badań,
- ocena wpływu temperatury na wytrzymałość i odkształcalność (w aparacie NAT) próbek z mieszanki MCE wybranej do badań szczegółowych,
- ocena zespolonego modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego oraz obliczenie rzeczywistej i urojonej składowej na podstawie uzyskanych wyników badań w prasie MTS,
- ocena odporności na pękanie niskotemperaturowe,
- ocena trwałości zmęczeniowej wybranych mieszanek MCE,
- wyznaczenie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie, stabilności Marshalla i innych cech fizyko-mechanicznych próbek wykonanych w laboratorium z mieszanki MCE pobranej z warstwy podbudowy,
- ocena cech fizyko-mechanicznych próbek (odwiertów) pobranych z warstw podbudowy z MMCE,
- analiza i interpretacja wyników badań ugięciomierzem FWD i belką Benkelmana nawierzchni o podbudowie z MMCE, wykonanych w różnych temperaturach,
- obliczenia trwałości podbudów proponowanych konstrukcji nawierzchni za pomocą mechanistycznych metod wymiarowania.

Zakres wstępnych badań laboratoryjnych obejmuje określenie podstawowych cech fizycznych i mechanicznych próbek z mieszanek MCE:

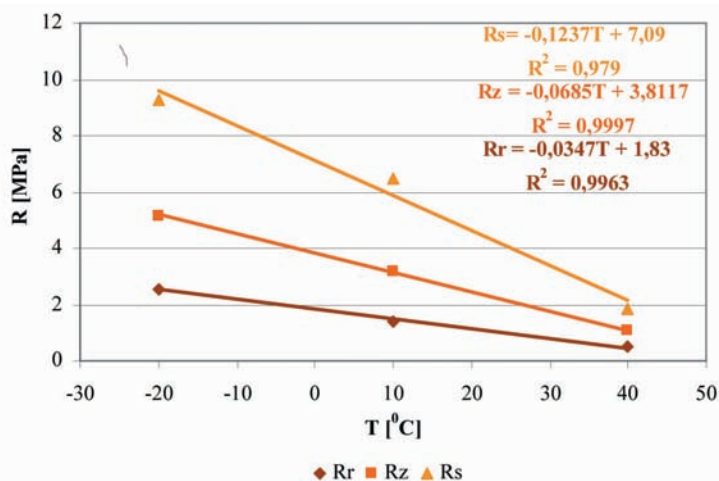
- gęstość właściwa (objętościowa),
- gęstość pozorna (strukturalna),
- wolna przestrzeń,
- nasiąkliwość,
- wodoodporność,
- mrozoodporność,
- wytrzymałość na rozciąganie pośrednie,
- wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu,
- stabilność i odkształcenie Marshalla,
- moduł sztywności pełzania.

Badania zasadnicze wykonane zostały na wybranych mieszankach ustalonych na podstawie analizy badań wstępnych. Program badań zasadniczych obejmował, wymienione wcześniej, zaawansowane badania funkcjonalne i nietypowe badania nowatorskie.

Badania terenowe przeprowadzone zostały przez autora oraz wyspecjalizowane jednostki badawcze, dysponujące zaawansowaną technologicznie aparaturą badawczą (FWD).

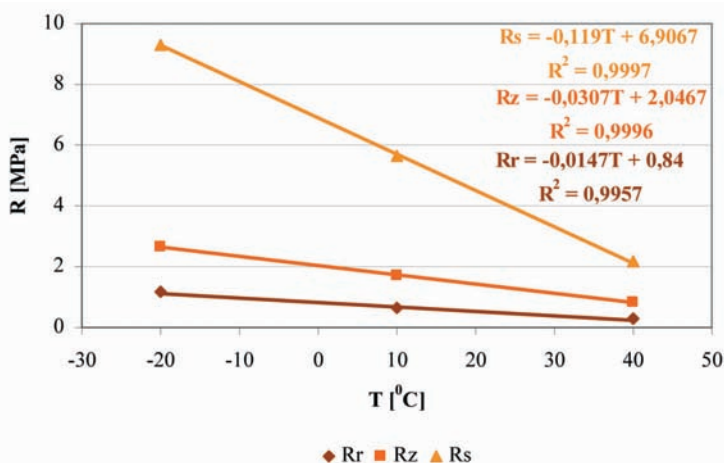
## 2. Zastosowane metody analizy i rezultaty pracy

Do analizy wyników badań laboratoryjnych i terenowych wykorzystano hipotezy statystyczne, krzywą wiodącą zespolonego modułu sztywności, metody „odwrotnych obliczeń” modułów sprężystości na podstawie pomiaru ugięć sprężystych płytą FWD z zastosowaniem programów SF-PL i ELMOD oraz mechanistyczne metody projektowania konstrukcji nawierzchni z zastosowaniem programu BISAR. Wyniki wybranych badań wytrzymałościowych [1,2,3] przedstawiono na rys 1 i 2.



Rys. 1. Zależności 28 dniowej wytrzymałości próbek z MMCE o zawartości EmA - 3%, CEM=5% i uziarnieniu 0/25 mm od temperatury badania ( $R_s$  – osiowe ściskanie,  $R_z$  – rozciąganie przy zginaniu,  $R_r$  – rozciąganie pośrednie).

Fig. 1. The relationship between ( $R_s$  – compressive,  $R_z$  – bending,  $R_r$  – indirect tensile) strengths of MCEM E/C=3/5 samples in granulation 0/16 mm and the temperature in tests.



Rys. 2. Zależność 28 dniowej wytrzymałości próbek z MMCE 3/5 o zawartości EmA=3%, CEM=5% i uziarnieniu 0/16 mm od temperatury badania ( $R_s$  – osiowe ściskanie,  $R_z$  – rozciąganie przy zginaniu,  $R_r$  – rozciąganie pośrednie).

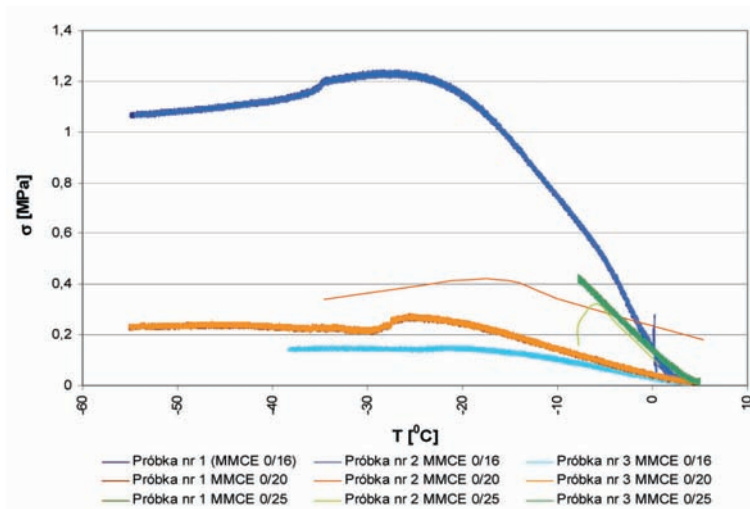
Fig. 2. The relationship between ( $R_s$  – compressive,  $R_z$  – bending,  $R_r$  – indirect tensile) strengths of MCEM E/C=3/5 samples in granulation 0/16 mm and the temperature in tests.

Badanie wytrzymałości na rozciąganie termiczne przy ograniczonym skurczu przeprowadzono zgodnie z normą [4] (fot. 1), a uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 3.



Fot. 1. Próbkę z mieszanki MCE o wymiarach 50x50x300 mm z zamocowanym czujnikiem pomiarowym analizatora EA 100 w komorze klimatyzacyjnej.

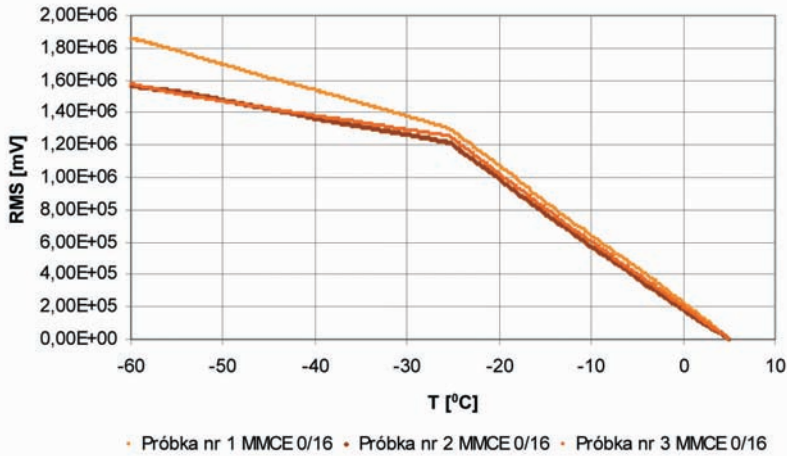
Photo 1. Sample of MCEM 50x50x300 mm with piezoelectric transducer EA 100 in thermal chamber.



Rys. 3. Wykres naprężeń w badaniu TSRST próbek MMCE E/C=3/5 o uziarnieniu 0/16 mm, 0/20 mm i 0/25 mm.

Fig. 3. The stress curve obtained in TSRST of MCEM samples E/C=3/5 in gradation 0/16 mm, 0/20 mm and 0/25 mm.

Pomiar emisji akustycznej podczas badania wytrzymałości na rozciąganie termiczne przy ograniczonym skurczu przedstawiono w postaci zależności przyrostu wartości skutecznej sygnału (RMS) od temperatury (rysunek 4.).



Rys. 4. Zarejestrowana wartość RMS próbek MMCE 3/5 o uziarnieniu 0/16 podczas badania wytrzymałości na rozciąganie termiczne przy ograniczonym odkształceniu TSRST.

Fig. 4. The Root Mean Square (RMS) curve of MCEM samples E/C=3/5 in granulation 0/16 mm obtained in acoustic measurement during the TSRST strength test.

Badanie zespolonego modułu sprężystości i kąta przesunięcia fazowego przeprowadzono zgodnie z normą [5] w prasie uniwersalnej MTS na próbkach walcowych  $\phi$  98,8×160 mm (Fot. 2), wyciętych z płyty 300×300×180 mm zagęszczonej metodą prasowania.

Na podstawie przeprowadzonych badań zespolonego modułu sztywności obliczono krzywą wiodącą według równania Medani, Huurmana [6, 7]:

$$\log(\Psi_{mix}) = \log(\Psi_{min}) + [\log(\Psi_{max}) - \log(\Psi_{min})] \cdot S \quad (1)$$

$$S = 1 - \exp\left[-\left(\frac{10 + \log x_{fict}}{\beta}\right)^\gamma\right] \quad (2)$$

w którym:  $\Psi_{mix}$  – modelowany moduł zespolony mieszanki MCE, MPa,  $\Psi_{min}$  – najmniejsza wartość modułu zespolonego MMCE, MPa,  $\Psi_{max}$  – największa wartość modułu zespolonego MMCE, MPa,  $x_{fict}$  – zredukowana częstotliwość ( $f_{red}$ ), Hz,  $\beta, \gamma$  – parametry kształtu krzywej.

Do wyznaczenia zredukowanej częstotliwości posłużono się równaniem:

$$x_{fict} = x \cdot a_T \quad (3)$$

gdzie:  $a_T$  – współczynnik przesunięcia temperaturowego,  $x$  – częstotliwość ( $f$ ), Hz.

Współczynnik przesunięcia temperaturowego obliczono na podstawie równania Arrheniusa:

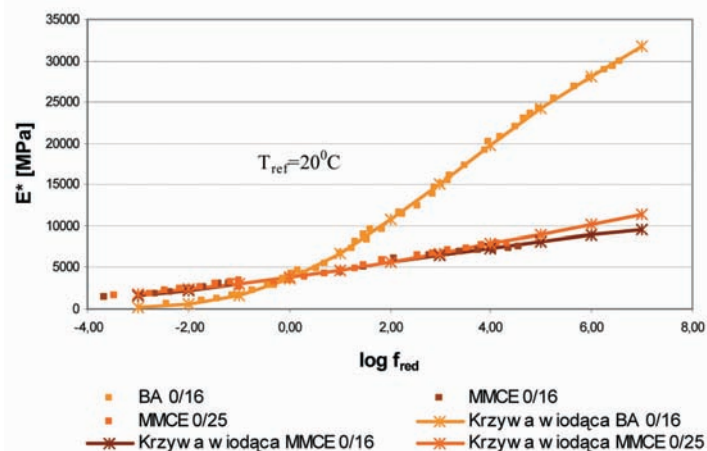
$$\log a_T = 0,4343 \cdot \frac{\delta H}{R} \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (4)$$

w którym:  $\delta H$  – charakterystyczna energia aktywacji materiału (210 kJ/(mol·K)),  $R$  – uniwersalna stała gazowa (8,31 J/(mol·K)),  $T$  – temperatura, K,  $T_0$  – temperatura odniesienia, K.



Fot. 2. Próbkę walcową MMCE przygotowaną do badania zespolonego moduły sztywności w prasie MTS.

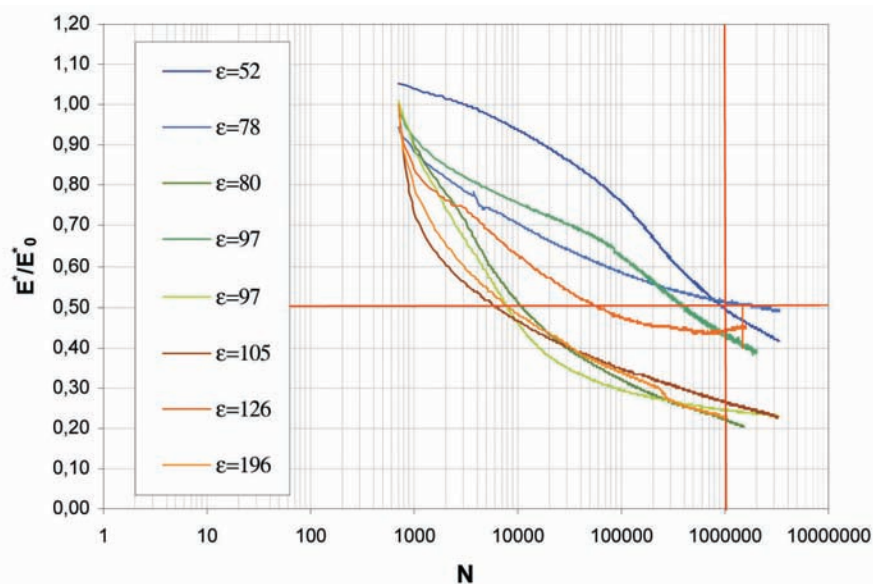
Photo 2. Cylindrical sample of MCEM prepared to complex stiffness modulus test in MTS press.



Rys. 5. Krzywe wiodące mieszanek MCE (EmA=3%, CEM=5%) o uziarnieniu 0/16 i 0/25 mm oraz betonu asfaltowego o uziarnieniu 0/16 mm z asfaltem 35/50.

Fig. 5. The master curves of complex stiffness modulus of MCEM (EmA=3%, CEM=5%) in granulation 0/16 mm and 0/25 mm compared with BM (bitumen 35/50, granulation 0/16 mm).

Badania odporności na zmęczeniowe przeprowadzono zgodnie z EN 12697-24 „Odporność na zmęczenie” natomiast wymagania określono na podstawie norm EN 13108-1:2003 „Beton asfaltowy” oraz EN 13108-4 HRA [8]. Wyniki badań zmęczeniowych próbek walcowych  $\phi$  98,8 mm MMCE (EmA=3%, CEM=5%) o uziarnieniu 0/25 mm poddanych cyklowi obciążenia o częstotliwości 20 Hz w temperaturze 10°C przy kontrolowanym (zadany) odkształceniu przedstawiono w postaci spadku zespolonego modułu sztywności, którego wartość po 1 mln obciążeń nie powinna być mniejsza od 50% wielkości początkowej.



Rys. 6. Zależność pomiędzy wielkością spadku wartości zespolonego modułu sztywności i ilością cykli obciążeniowych próbek cylindrycznych z MMCE ( $E/C=3/5$ ) przy kontrolowanym odkształceniu (wartość  $\varepsilon$  podano w mikroodkształceniach).

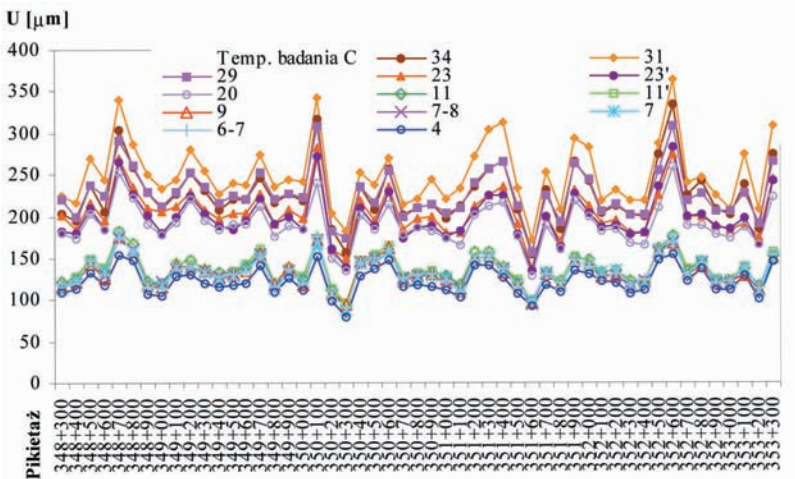
Fig. 6. The relationship between the decrease of complex stiffness modulus of cylindrical samples of MCEM  $E/C=3/5$  in granulation 0/25 mm and the amount of loading cycles with controlled strain in compression-tension test in MTS press ( $\varepsilon$  -  $\mu$ strain).

Wyniki wybranych badań terenowych przedstawiono na rysunkach 7 i 9. Badania i analizy zasadnicze miały charakter ilościowy (13 pomiarów w 51 punktach daje razem 663 badań FWD).

Do obliczeń wartości modułów sprężystości wykorzystano programy ELMOD, MODDYN oraz autorski program opracowany przez S. Firleja (SF-PL). Przyjęto model dwuwarstwowej ( $E_1$  – podłoże,  $E_2$  – podbudowa, warstwy wiążąca i ściernalna) oraz trójwarstwowej półprzestrzeni sprężystej ( $E_1$  – podłoże,  $E_2$  – podbudowa,  $E_3$  – połączone warstwy ściernalna i wiążąca).

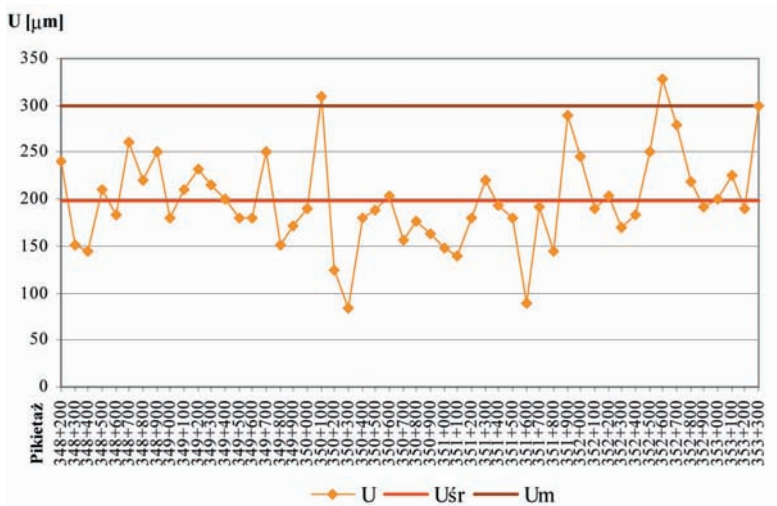
Przyjęte wartości modułów sprężystości warstw ściernalnej i wiążącej, na podstawie interpolacji wartości zamieszczonych w Dz. U. 43/1999 zgodnie z poz.5.2. „założenia materiałowe”, mają duży wpływ na uzyskiwane wartości modułu sprężystości podbudowy MMCE zwłaszcza w temperaturach pośrednich pomiędzy okresem jesień-zima i zima-wiosna (10°C do -2°C), wiosna-lato i lato-jesień (10°C do 23°C) w przypadku 2-warstwowej półprzestrzeni sprężystej.

Uzyskane wyniki pozwoliły na ustalenie liniowej korelacji pomiędzy modułem sprężystości (według modelu dwuwarstwowego) i temperaturą podbudowy z MMCE, którą przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 7. Zbiornicze wykresy ugięć w osi obciążenia płytą FWD na odcinku drogi nr 19 (Borki – Kock 2001 r.) wykonanych przy różnych temperaturach badania.

Fig. 7. The summary graphs of deflection in axis of burden the FWD plate on the section of road No. 19 ( the Borki - Kock 2001 year) executed in different temperatures.

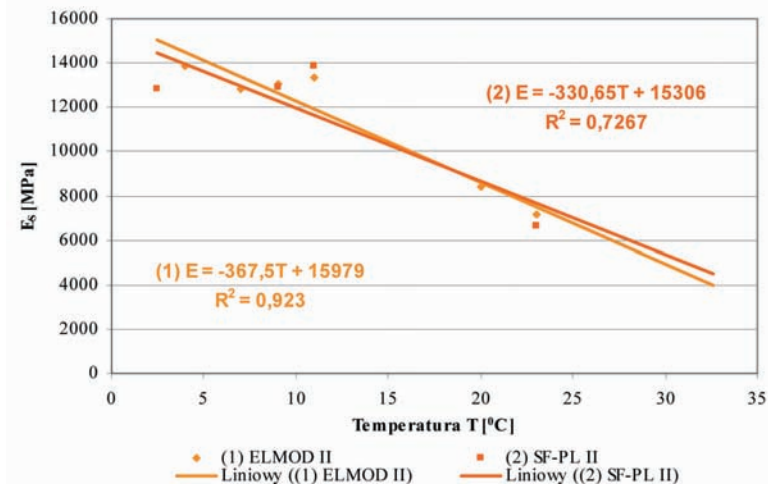


Rys. 8. Średnie moduły sprężystości ( $E_2$ ) warstwy podbudowy z MMCE i warstw z betonowego obliczone przyjmując model dwuwarstwowej półprzestrzeni sprężystej (wg programów ELMOD i SF-PL).

Fig. 8. The average values of resilience modules ( $E_2$ ) of the foundation made of MMCE and asphalt layers calculated presumed two elastic layer halfspace model (on the basis of the ELMOD and the SF-PL programmes).

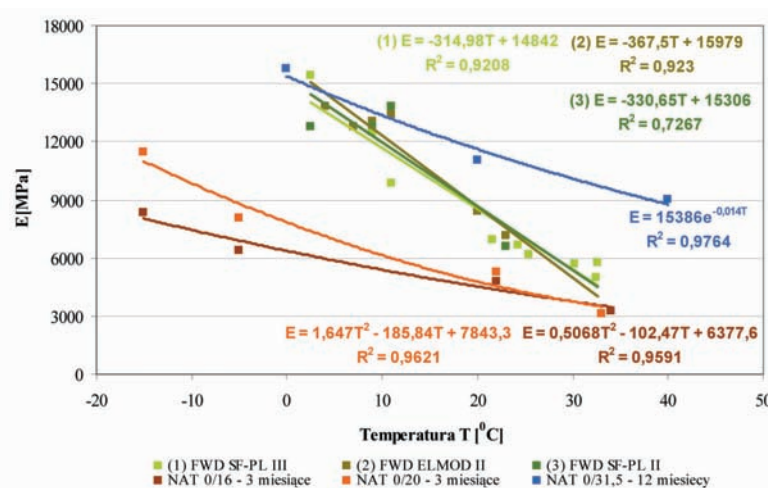
W przypadku modelu 3-warstwowego półprzestrzeni sprężystej różnice obliczeń wg programu ELMOD i SF-PL są większe a zatem uzyskane wyniki przy takim założeniu nie są jednoznaczne.





Rys. 9. Ugięcia sprężyste pomierzone za pomocą belki Benkelmana w temperaturze badania 11°C  
 Fig. 9. Obtained elastic deflections in Benkelman's beams surveys in 11°C temperature.

Na rysunku 10 zestawiono wyniki badań modułu sprężystości w aparacie NAT [9] oraz wartości obliczone za pomocą programów odwrotnych obliczeń.



Rys. 10. Zestawienie korelacji pomiędzy modułami sztywności sprężystej próbek MMCE ( $E_{mA}=3\%$ ,  $CEM=5\%$ ) wyznaczonych w aparacie NAT oraz obliczonych na podstawie pomiarów FWD i temperaturą badania.

Fig. 10. Comparison of correlation of stiffness modulus of samples the MMCE ( $E_{mA} = 3\%$ ,  $CEM = 5\%$ ) appointed in the NAT apparatus as well as calculated on the back calculation of the FWD measurement and temperature of investigation.

Różnice pomiędzy modułami sprężystości według NAT i FWD są spowodowane zmianami struktury podbudowy z MMCE w początkowym okresie eksploatacji jak wynika z badań zmęczeniowych.

Rezultatem pracy jest ustalenie parametrów materiałowych niezbędnych do projektowania konstrukcji nawierzchni oraz ich aplikacja do obliczeń konstrukcji nawierzchni z podbudową z MMCE metodami mechanistycznymi.

Do obliczeń trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni przyjęto kryterium według Instytutu Asfaltowego USA zgodnie z katalogiem [11]:

$$N_f^{asf} = 18,4 \cdot C \cdot \left( 6,167 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon_r^{-3,291} \cdot |E^*|^{-0,854} \right) \quad (5)$$

$$C = 10^M \quad (6)$$

$$M = 4,84 \cdot \left( \frac{V_b}{V_b + V_a} - 0,69 \right) \quad (7)$$

w którym:  $N_f^{asf}$  – trwałość zmęczeniowa nawierzchni,  $E^*$  – moduł sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej [MPa],  $\varepsilon_r$  – odkształcenia rozciągające w spodzie dolnej warstwy asfaltowej,  $V_b$  – zawartość objętościowa asfaltu [%],  $V_a$  – zawartość objętościowa wolnych przestrzeni [%].

W celu sprawdzenia odporności konstrukcji na deformacje strukturalne przyjęto kryterium według Instytutu Asfaltowego USA:

$$\varepsilon_c = k \cdot \left( \frac{1}{N_f^{gr}} \right)^m \quad (8)$$

w którym:  $\varepsilon_c$  – pionowe odkształcenie ściskające na poziomie podłoża gruntowego,  $N_f^{gr}$  – trwałość zmęczeniowa do wystąpienia krytycznej deformacji strukturalnej w konstrukcji nawierzchni,  $k$ ,  $m$  – współczynniki materiałowe (w katalogu [39] przyjęto współczynniki Chevrona –  $k = 1,05 \cdot 10^{-2}$ ,  $m=0,223$ ).

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz zaproponowano typowe konstrukcje nawierzchni o podbudowie z mieszanki MCE o składzie: 5% łącznej zawartości asfaltu, 5% cementu przy zawartości wolnych przestrzeni  $\leq 16\%$ .

Tabela 1. Proponowane przez autora typowe konstrukcje nawierzchni podatnej o podbudowie z MMCE (grubości warstw w cm).

Table 1. Typical flexible pavement constructions with base made of MCEM (thickness of layers in cm) proposed by the author.

Kategoria ruchu					
Liczba osi obliczeniowych 100 kN/pas/dobę					
KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6
4 ÷ 12	13 ÷ 70	71 ÷ 335	336 ÷ 1000	1001 ÷ 2000	>2001

	- Warstwa ścieralna z mieszanki mineralno-asfaltowej		- Warstwa podbudowy z betonu asfaltowego
	- Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego		- Warstwa podbudowy z mieszanki MCE

### 3. Wnioski końcowe

1. Wyniki badań modułu zespolonego pozwalają stwierdzić, że badana MMCE 3/5 (3% EmA i 5% CEM) posiada cechy lepko-sprężyste o przewodze części rzeczywistej nad urojoną. Ponad 3-krotnie większa wartość modułu zespolonego w temperaturze 40°C mieszanki MCE w stosunku do BA powoduje, że podbudowy z MMCE są najbardziej narażone na przeciążenie w okresie lata.

2. Analiza krzywej wiodącej, opracowanej w oparciu o wyniki badań modułu zespolonego w prasie MTS pozwala wnioskować, że zespolony moduł sztywności mieszanki MCE jest zbliżony do betonu asfaltowego w temperaturze 20°C przy częstotliwości obciążenia 1Hz, natomiast w niskich temperaturach (<0°C) posiada korzystniejsze cechy od betonu asfaltowego (mniejszy zespolony moduł sztywności). Wniosek ten potwierdzają także inne wyniki badań laboratoryjnych.

3. Trwałość zmęczeniowa próbek z mieszanek MCE 3/5 gwałtownie spada w początkowym okresie obciążania, przy zadanym stałym odkształceniu  $\epsilon_r \geq 100 \cdot 10^{-6}$ , poniżej dopuszczalnej wartości 50% pierwotnego modułu sztywności po przekroczeniu, której nie następuje jednak zniszczenie próbki. Przy odkształceniach poniżej  $\epsilon_r < 100 \cdot 10^{-6}$  próbki MMCE spełniają kryterium spadku modułu sztywności tj. nie więcej jak 50% po 1 mln cykli obciążenia.

4. Wcześniejsze wnioski (nr 1÷3) są wystarczające, aby przyjąć kryterium Instytutu Asfaltowego USA wymiarowania konstrukcji nawierzchni o podbudowach z MMCE. Wyniki badań zmęczeniowych oraz wyznaczone miarodajne moduły sztywności sprężystej dla temperatury 23°C na podstawie badań FWD potwierdzają gwałtowny spadek modułu sztywności próbek i podbudowy z MMCE w wyniku cykli obciążeniowych w temperaturze  $\geq 23^\circ\text{C}$ .

5. Podbudowy z MMCE o uziarnieniu 0/31,5 mm są bardzo niejednorodne, jak wynika z analizy badań FWD, ugięć sprężystych belką Benkelmana i promieni krzywizny, wykonanych w różnych temperaturach na odcinku długości 5 km po rocznej eksploatacji. Trwałość nawierzchni obliczona metodą Instytutu Asfaltowego USA oraz metodą ugięć sprężystych za pomocą belki Benkelmana odpowiada przyjętej w projekcie kategorii ruchu KR4.

6. Ograniczenie odkształcenia rozciągającego w spodzie warstwy podbudów z MMCE w konstrukcji nawierzchni dróg o natężeniu ruchu KR3÷KR6 do poziomu  $\epsilon_r^{dop} = 80 \cdot 10^{-6}$  powinno zapewnić spełnienie kryteriów trwałości zmęczeniowej.

7. Z badania odporności na obniżanie temperatury przy powstrzymywanym skurczu z jednoczesnym pomiarem emisji akustycznej można wnioskować, że próbki z mieszanki MCE 3/5 o uziarnieniu 0/16 mm nie ulegają zniszczeniu i charakteryzują się stałym przyrostem naprężeń do  $\sigma = 1,2 \text{ MPa}$  w temperaturze -25°C.

8. Dobrą jednorodność i trwałość, jak można wnioskować z analizy wykonanych badań laboratoryjnych, można uzyskać w przypadku mieszanek MCE o uziarnieniu 0/16 mm i 0/20 mm.

9. Wskaźnik wodoodporności i mrozoodporności  $WR > 0,7$  może służyć jako kryterium do oceny odporności mieszanek MCE na warunki klimatyczne. W badaniach autora stwierdzono, że wodo- i mrozoodporność mieszanek MCE według metody AASHTO T283 jest korzystniejsza od wyników uzyskiwanych w metodzie jak dla betonów cementowych.

10. Ocena stabilności MMCE według konwencjonalnej metody Marshalla nie powinna być stosowana do badania mieszanek gruboziarnistych (0/31,5 mm). Z praktycznych doświadczeń wykonania podbudów z MMCE, próby koleinowania

w aparacie Coopera oraz badań modułu sztywności sposobem pełzania w temperaturze 40°C można wnioskować, że mieszanki te są odporne na koleinowanie.

## Literatura

- [1] PN-EN 12390-3:2002 *Badania betonu. Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.*
- [2] PN-EN 12390-5:2001 *Badania betonu. Wytrzymałość na zginanie.*
- [3] PN-EN 12390-6:2001 *Badania betonu. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badania.*
- [4] AASHTO Provisional Standard TP10 - 93: *Standard Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Tensile. Test Strength.*
- [5] ASTM D 3497 - 97 (Reproved 1995) *Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures.*
- [6] Sybilski D., *Ocena właściwości niskotemperaturowych lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych*, Drogi i Mosty IBDiM, Warszawa 2/2004.
- [7] Sybilski D., *Wyznaczenie krzywej wiodącej mieszanki mineralno-asfaltowej*, IV Międzynarodowa Konferencja *Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe* Kielce, maj 1998 r.
- [8] AASHTO Provisional Standard: *Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending TP8-94.*
- [9] BSI DD 231:1993 *Method for Determination of the Indirect Tensile Stiffness Modulus of Bituminous Mixtures.*
- [10] *Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych*, IBDiM, W-wa 2001 r.

## Durability of mineral-cement-emulsion mixtures bases (MCEM)

Jerzy Kukielka

*Lublin University of Technology, Faculty of Civil and Sanitary Engineering,  
Chair of Road Engineering, e-mail: jerzy.kukielak@pollub.pl*

**Abstract:** Cold recycling technology with mineral-cement-emulsion mixtures (MCEM) consists of the milling of worn road asphalt layers and shuffle got crumbled material, called the RAP, with new broken aggregate, cement and asphalt emulsion in stationary devices or by realization of all technological actions on the spot (“in situ”) using the recycler. The aim of the work was the settlement of factors having the influence on durability of bases made of MCEM which were realized by detailed aims such as: the description of structure of MCEM, the assessment of influence of temperature on strength and deformability of samples made of MCEM, the settlement of rheological properties by combined stiffness modulus and loss angle, the assessment of fatigue durability the of samples of the MMCE, the assessment of resistance for low temperature cracking (the TSRST), the analysis and interpretation of surveys in fieldworks (the FWD, the Benkelman’s beam). The main issue of investigations is the application to the dimensioning of pavement construction with base made of MCEM.

**Key words:** Mineral-Cement-Emulsion Mixture, recycling, base, durability.