

**prof. nzw. dr hab. inż. Dariusz Sybilski**  
**mgr inż. Jerzy Kukielka**  
Politechnika Lubelska, Polska

## **REOLOGICZNE CECHY MIESZANKI MINERALNO CEMENTOWO- EMULSYJNEJ (MCE) NA PODSTAWIE KRZYWEJ WIODĄCEJ**

### **RHEOLOGICAL PROPERTIES OF MINERAL CEMENT-EMULSION (MCE) MIXTURES ON THE BASIS OF THE MASTER CURVE**

#### **Streszczenie**

Krzywa wiodąca przedstawia zależność zespolonego modułu sztywności od „zredukowanej” częstotliwości lub czasu obciążenia i charakteryzuje materiał w szerokim zakresie temperatury. Pozwala ona na wyznaczenie dowolnej wartości modułu pod względem warunków obciążenia i temperatury w zależności od potrzeb związanych z wymiarowaniem konstrukcji nawierzchni.

W referacie przedstawiono wyniki badań zespolonego modułu sztywności przeprowadzonych w laboratorium IBDiM w Warszawie mieszanek MCE o składzie: 50% destruktu, 3% emulsji asfaltowej, 5 % cementu 32,5 i uziarnieniu 0/16 mm oraz 0/25 mm. Ustalona na podstawie otrzymanych wyników badań krzywa wiodąca mieszanek MCE znacznie różni się od MMA.

Analiza krzywej wiodącej badanej mieszanki MCE pozwala stwierdzić, że posiada ona moduły większe od MMA w temperaturze  $>20^{\circ}\text{C}$  oraz mniejsze moduły od MMA w temperaturach  $<20^{\circ}\text{C}$ . Podbudowy wykonane z MMCE mogą zatem być narażone na przeciążenie w okresie lata z powodu większej ich sztywności od warstw z MMA w wysokich temperaturach.

#### **Summary**

Master curve characterizes materials in wide range of temperature representing relationship between complex stiffness modulus and reduced frequency or time of loading. It allows calculating any value of complex stiffness modulus related to requirements of pavement constructions dimensioning in regard to conditions of loading and temperature.

This paper presents the results of investigations of complex stiffness modulus carried out in laboratory of Road and Bridge Research Institute in Warsaw on MCE mixtures in composition: 50% RAP, 3% asphalt emulsion, 5 % cement 32,5 and granulation 0/16 mm and 0/25 mm. The master curves of MCE mixtures obtained on the basis of the results differs considerably from bituminous mixture (BM).

The analysis of the master curve of the MCE mixtures allows stating that values of complex stiffness modulus in temperature  $>20^{\circ}\text{C}$  are larger than for BM and in temperature  $<20^{\circ}\text{C}$  are smaller. Bases made of MCE mixtures can be therefore expose to overload in summer for the reason of their larger stiffness than BM layers in high temperatures.

## 1. Skład badanej mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej MCE

Zaprojektowano dwa składy mieszanki MCE o uziarnieniu 0/16 mm i 0/25 mm tak, aby uzyskać ciągłość uziarnienia w pobliżu górnej i dolnej granicy dobrego uziarnienia mieszanek dla obciążenia ruchem KR3+KR6, a zawartość destruktu wynosiła 50%. Do badań przyjęto następujące receptury mieszanek MCE:

- destruktu 50% (zawartość starego asfaltu 6,2 %)
- cement portlandzki CEM II klasy 32,5 w stosunku do mieszanki mineralnej: 5%,
- emulsja asfaltowa EmA-99 (w stosunku do mieszanki mineralno-cementowej): 3%,
- kruszywo doziarniające 45% (50% wraz z cementem w ilości 5%),
- woda została przyjęta w łącznej ilości (uwzględniając wodę z emulsji) 5% do mieszanek 0/16 mm i 4% do mieszanek 0/25 mm na podstawie badania zagęszczenia w ubijaku Marshalla (50 uderzeń na stronę) i określenia maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu.

## 2. Zespolony moduł sztywności

Badanie modułu zespolonego w odniesieniu do MMCE, w których występują także wiązania krystaliczne, ma główne znaczenie dla ustalenia cech lepko-sprężystych materiału. Zmienne obciążenia są podstawą do wyznaczenia modułu zespolonego z wykorzystaniem następujących wzorów [1, 2, 3]:

$$\sigma = \sigma_a \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_a \cdot e^{i(\omega \cdot t - \varphi)} \quad (2)$$

w których:  $\sigma_a$  – amplituda naprężenia,  
 $\omega$  – prędkość kątowna zmian naprężenia ( $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – częstotliwość [Hz]),  
 $t$  – czas,  
 $i$  – jednostka urojona,  
 $\varepsilon_a$  – amplituda odkształcenia,

$$E_{(i\omega)}^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \cdot e^{i\varphi} = |E^*| \cdot \cos \varphi + |E^*| \cdot i \cdot \sin \varphi = E_1 + E_2 \cdot i \quad (3)$$

w którym:  $E_1$  – część rzeczywista modułu zespolonego, stanowi część odzyskiwaną energii magazynowanej  
 $E_2$  – część urojona modułu zespolonego, stanowi energię rozproszoną w skutek tarcia wewnętrznego.

$$E_1 = |E^*| \cdot \cos \varphi = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \cdot \cos \varphi = \frac{\sigma_{ea}}{\varepsilon_a} \quad (4)$$

$$E_2 = |E^*| \cdot \sin \varphi = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \cdot \sin \varphi = \frac{\sigma_{ev}}{\varepsilon_a} \quad (5)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{E_2}{E_1}\right), \quad |E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (6)$$

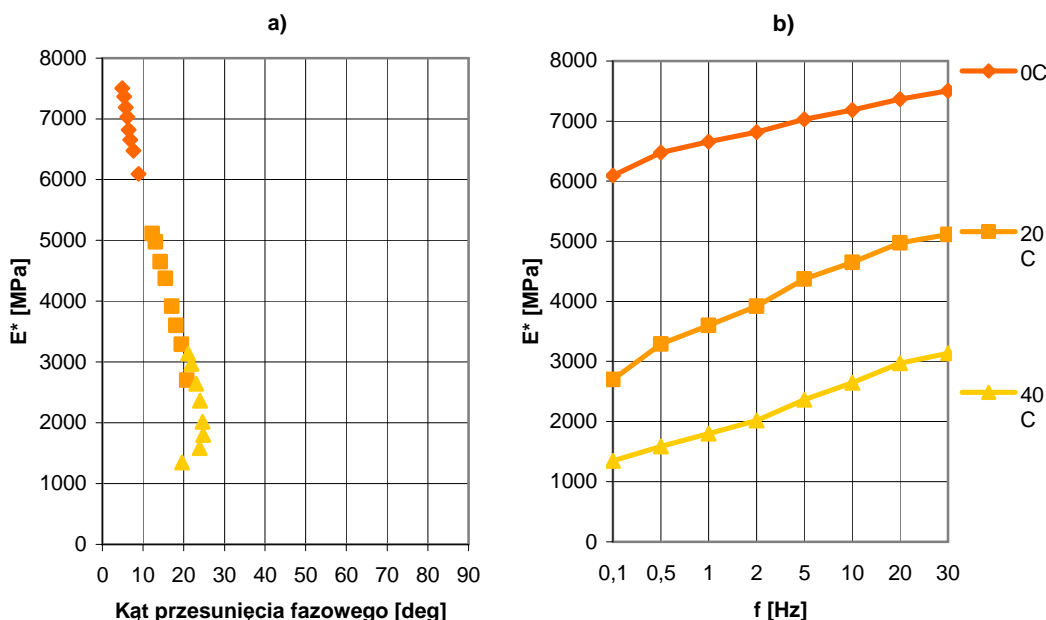
w których:  $\varphi$  – kąt przesunięcia fazowego,  
 $\sigma_{\epsilon a}$  – wartość naprężenia, gdy odkształcenie osiąga największą wartość ( $\epsilon_a$ ),  
 $\sigma_{\epsilon 0}$  – wartość naprężenia, któremu odpowiada zerowe odkształcenie przy jego sinusoidalnej zmianie.

Sinusoidalne zmiany obciążenia w badaniu, nie odpowiadają rzeczywistemu charakterowi obciążeń nawierzchni, pozwalają jednak na określenie własności reologicznych materiału. Kąt przesunięcia fazowego określa cechy materiału przyjmując charakterystyczne wartości  $\varphi=0$  dla materiałów sprężystych i  $0<\varphi<90^0$  dla lepko-sprężystych. Badania modułu i kąta przesunięcia fazowego mogą być wykonywane w różnej temperaturze od  $-10$  do  $+40^{\circ}\text{C}$  i z różną częstotliwością obciążenia np.  $0,1\div 40$  Hz [3].

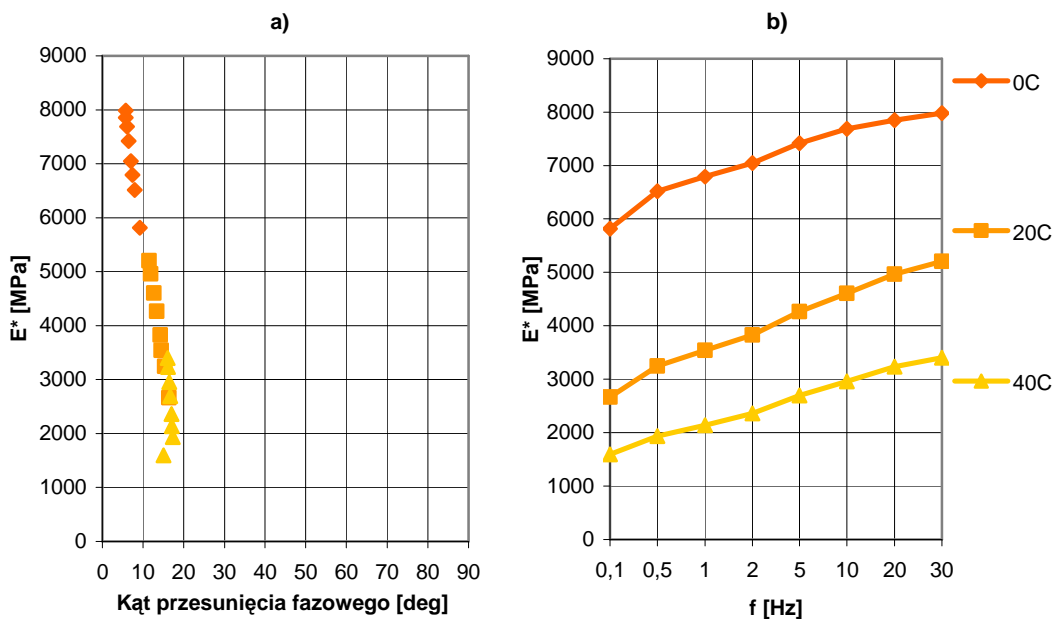
Badanie zespolonego modułu sprężystości i kąta przesunięcia fazowego przeprowadzono zgodnie z normą [4] w prasie uniwersalnej MTS w laboratorium IBDiM w Warszawie na próbkach walcowych  $\phi 98,8\times 160$  mm, wyciętych z płyty  $300\times 300\times 180$  mm, zagęszczonej metodą prasowania.

Badania własne wykonano w temperaturze  $0, 10, 40^{\circ}\text{C}$  przy częstotliwościach obciążenia  $0,1, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 30$  Hz. Otrzymane wyniki przedstawiono w postaci graficznej za pomocą krzywej Blacka i izotermi zespolonego modułu sztywności na rysunkach 3 i 4.

Mały kąt przesunięcia fazowego świadczy o przewadze części sprężystej w mieszance MCE. Uzyskany z badania moduł zespolony charakteryzuje się zbliżonymi wartościami do betonów asfaltowych [5] w temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$  natomiast w temperaturze  $40^{\circ}\text{C}$  jest on ponad 4-krotnie większy od MMA. Możemy zatem stwierdzić, że MMCE jest mniej wrażliwa na wysoką temperaturę od mieszanek MMA w aspekcie koleinowania. Ponadto nachylenie krzywej modułu MMCE w zależności od częstotliwości badania jest znacznie mniejsze od MMA, co świadczy o większej odporności na obciążenia statyczne w wysokiej temperaturze.

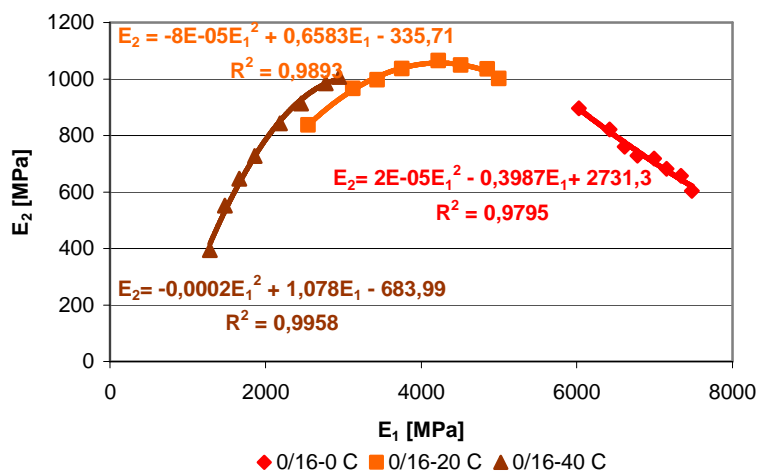


Rys. 3. Wyniki badań zespolonego modułu sztywności  $E^*$  mieszanki MCE o uziarnieniu 0/16 mm: a) krzywa Blacka, b) izoterma

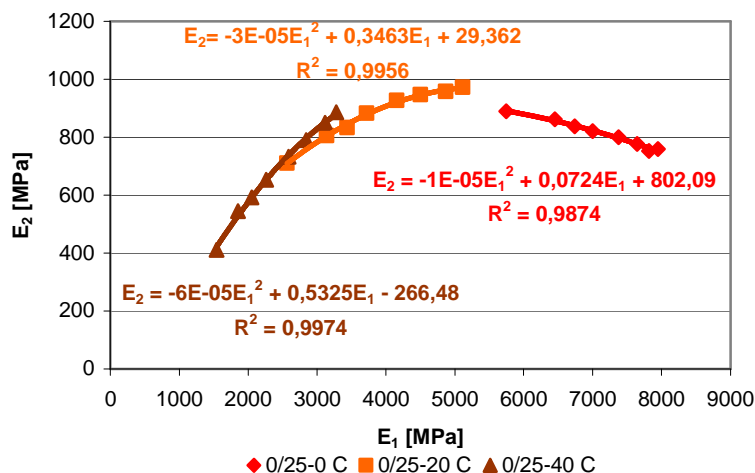


Rys. 4. Wyniki badań zespolonego modułu sztywności  $E^*$  mieszanki MCE o uziarnieniu 0/25 mm: a) krzywa Blacka, b) izoterma

Obliczone na podstawie wzorów (5) i (6) wartości części rzeczywistej ( $E_1$ ) i urojonej ( $E_2$ ) zespolonego modułu sztywności dla mieszanek MCE o uziarnieniu 0/16 mm i 0/25 mm przedstawiono w postaci wykresu Cole-Cole (rysunki 5 i 6). Wykres ten pozwala ustalić korelację pomiędzy  $E_2$  i  $E_1$  w zależności od częstotliwości przyłożonego obciążenia i temperatury badania.



Rys. 5. Wykres Cole-Cole zależności pomiędzy częścią lepką i sprężystą modułu zespolonego próbek z mieszanki MCE o uziarnieniu 0/16 mm



Rys. 6. Wykres Cole-Cole zależności pomiędzy częścią lepka i sprężystą modułu próbek z mieszanki MCE o uziarnieniu 0/25 mm

Mieszanka MCE 3/5 posiada przewagę części sprężystej a zatem zwiększenie dodatku cementu do zawartości 5% wpływa na usztywnienie materiału. Wielkości obliczonych modułów rzeczywistych i urojonych są do siebie zbliżone dla obu mieszanek MCE, co świadczy o małej zależności zespolonego modułu sztywności od uziarnienia.

### 3. Krzywa wiodąca

Wykorzystując zasadę superpozycji Boltzmanna, możliwą do stosowania w przypadku liniowej lepko-sprężystości ośrodka, według której jeżeli naprężenie  $\sigma_1(t)$  wywołuje odkształcenie  $\epsilon_1(t)$  i odpowiednio naprężenie  $\sigma_2(t)$  odkształcenie  $\epsilon_2(t)$ , to suma naprężeń  $\sigma_1(t)+\sigma_2(t)$  wywołuje odkształcenie  $\epsilon_1(t)+\epsilon_2(t)$ , możliwe jest opracowanie tzw. krzywej wiodącej. Wiadomym jest, że zachowanie próbek z mieszanek mineralno-asfaltowych zależy od temperatury i czasu obciążenia. Stan obciążenia w wysokiej temperaturze i krótkim czasie może być równoważny obciążeniu w niskiej temperaturze w długim czasie. Właściwości materiału wyznaczone w dowolnej temperaturze mogą być transponowane do innej temperatury według zasady superpozycji Williams-Landel-Ferry'ego [3]:

$$S_{(T,t)} = S_{(T_0, \frac{t}{a_T})} \quad (7)$$

w którym:  $S_{(T,t)}$  – moduł sztywności w temperaturze „T” i czasie obciążenia „t”,

$S_{(T_0, \frac{t}{a_T})}$  – moduł sztywności w temperaturze  $T_0$  i zredukowanym czasie obciążenia

$\frac{t}{a_T}$ ,  $a_T$  – współczynnik przesunięcia temperaturowego.

Większej częstotliwości zredukowanej ( $f_r$ ) odpowiadają większe wielkości modułu  $E^*$  w przypadku badań w każdej temperaturze. Poniżej krzywej wiodącej w temperaturze referencyjnej  $T_{ref} = 20^0C$  znajdują się (równoległe do niej) wyniki badań w  $30^0C$ , a ponad krzywą najbardziej oddalone są wyniki badań w  $-10^0C$ , którym odpowiadają moduły  $E^*$  zbliżone do charakteryzujących chude betony (bez spękań).

Do modelowania różnych cech mechanicznych materiału lepko-sprężysto-plastycznego posłużono się równaniem Medaniego i Huurmana [3].

$$\log(\Psi_{mix}) = \log(\Psi_{min}) + [\log(\Psi_{max}) - \log(\Psi_{min})] \cdot S \quad (8)$$

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

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:

$$x_{fict} = x \cdot a_T \quad (9)$$

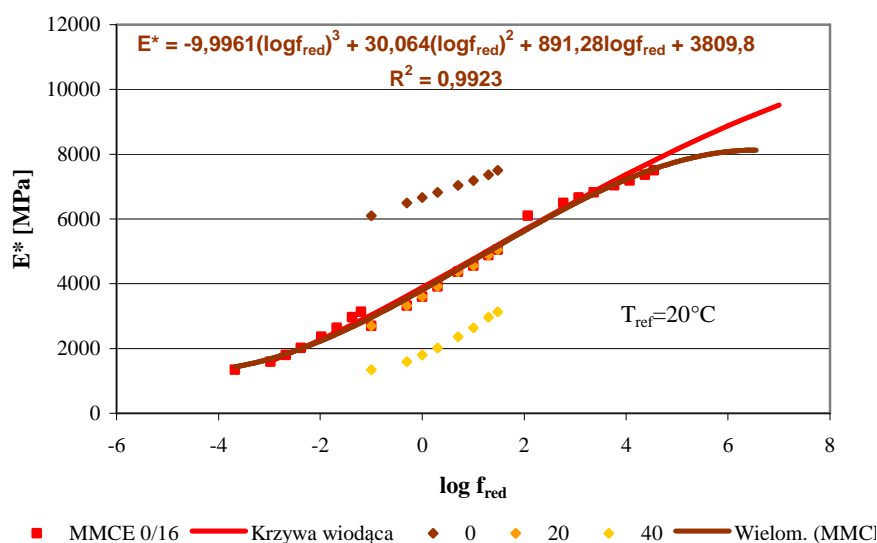
w którym:  $a_T$  - współczynnik przesunięcia temperaturowego,  
 $x$  - częstotliwość ( $f$ ), Hz.

Współczynnik przesunięcia temperaturowego obliczono na podstawie równania Arrheniusa:

$$\log a_T = 0,4343 \cdot \frac{\delta H}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right) \quad (10)$$

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

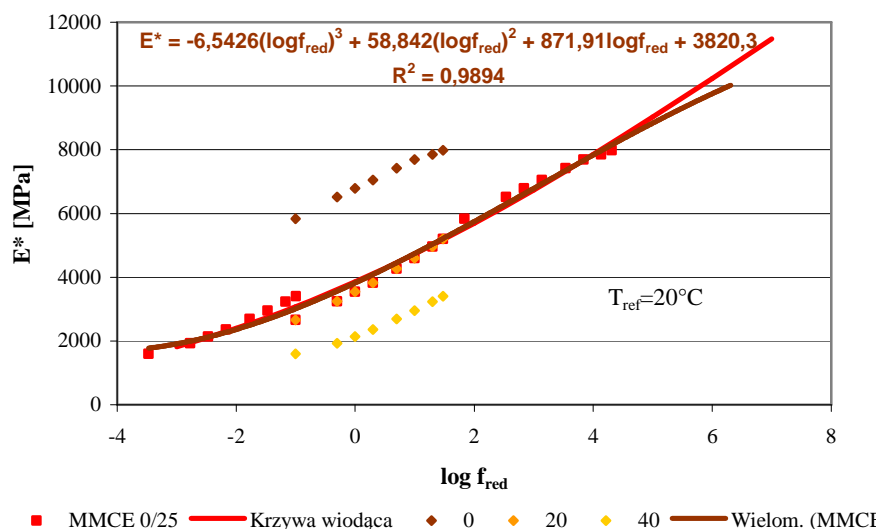
Krzywą wiodącą dla MMCE obliczono według równania Medani, Huurmana (8) oraz zaproponowano równanie wielomianu trzeciego stopnia (rysunki 7 i 8).



Rys. 7. Krzywa wiodąca dla mieszanki MCE o uziarnieniu 0/16 mm

Równanie Medani, Huurmana dla mieszanki MMCE o uziarnieniu 0/16, zawartości EmA=3% i CEM=5% przyjmuje postać:

$$\log(E^*_{mix}) = 0,884411656 + 3,2515195 \cdot \left[ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{10 + \log f_{red}}{26,36475541} \right)^{4,698841236} \right] \right]$$

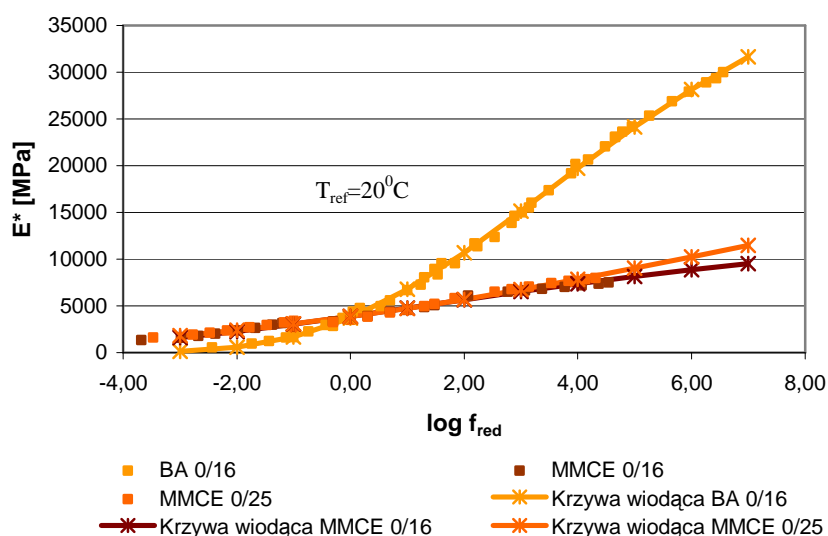


Rys. 8. Krzywa wiodąca dla mieszanki MCE o uziarnieniu 0/25 mm

Równanie Medani, Huurmana dla mieszanki MMCE o uziarnieniu 0/25, zawartości EmA=3% i CEM=5% przyjmuje postać:

$$\log(E^*_{mix}) = 2,001729392 + 2,5410237 \cdot \left[ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{10 + \log f_{red}}{106,0702557} \right)^{10,35861216} \right] \right]$$

Na rysunku 9 zestawiono wyznaczone krzywe wiodące zespolonego modułu sztywności próbek MMCE z przykładową krzywą dla betonu asfaltowego z asfaltem D35/50 (BA D50).



Rys. 9. Krzywe wiodące mieszanek MCE o uziarnieniu 0/16 mm i 0/25 mm oraz betonu asfaltowego o uziarnieniu 0/16 mm z asfaltem D35/50

Analiza wykresów pozwala stwierdzić, że dla  $\log(f_{red})=0$ , odpowiadającego temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$  i częstotliwości przyłożonego obciążenia  $f=1,0$  Hz, wartości zespolonych modułów sztywności są do siebie zbliżone niezależnie od mieszanki i wynoszą  $E^* \cong 4000$  MPa. Natomiast przy  $\log(f_{red})>0$  odpowiadającemu temperaturom  $<20^{\circ}\text{C}$  zespolony moduł sztywności próbek z BA D50 wzrasta w stosunku do próbek MMCE wraz ze wzrostem logarytmu częstotliwości zredukowanej, osiągając ponad 2-krotnie większą wartość w temperaturze około  $0^{\circ}\text{C}$  wynoszącą  $E^* \cong 20000$  MPa. Z kolei w temperaturach  $>20^{\circ}\text{C}$  a więc dla  $\log(f_{red})<0$  moduł zespolony próbek z mieszanek MCE jest większy od BA D50 i osiąga wartość  $E^* \cong 2000$  MPa dla  $\log(f_{red})=-2$ , co odpowiada temperaturze około  $40^{\circ}\text{C}$  i częstotliwości  $f=5$  Hz.

#### 4. Wnioski

1. Analiza krzywej wiodącej badanej MMCE, 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  $20^{\circ}\text{C}$  przy częstotliwości obciążenia 1Hz, w temperaturach wysokich ( $>20^{\circ}\text{C}$ ) jest znacznie większy natomiast w niskich temperaturach ( $<0^{\circ}\text{C}$ ) mniejszy (a więc posiada korzystniejsze cechy od betonu asfaltowego).
2. Wyniki badań modułu zespolonego pozwalają stwierdzić, że badana MMCE (3% EmA i 5% CEM) posiada cechy lepkosprężyste o przewadze części rzeczywistej nad urojoną. Z wykresów Cole-Cole wynika, że mieszanki MCE charakteryzują się większą wartością modułów rzeczywistych odzwierciedlających część sprężystą zespolonego modułu sztywności od modułów urojonych odzwierciedlających część lepką. Część rzeczywista  $E_1$  jest około 5-krotnie większa od urojonej  $E_2$  w temperaturze  $>20^{\circ}\text{C}$  i wzrasta wraz ze spadkiem temperatury do wartości ponad 10-krotnie ( $0^{\circ}\text{C}$ ) większych od części urojonej.
3. Ponad 3-krotnie większa wartość modułu zespolonego w temperaturze  $40^{\circ}\text{C}$  mieszanki MCE w stosunku od BA powoduje, że podbudowy z MMCE są najbardziej narażone na przeciążenie w okresie lata.

- 
- 1 Dietrich L., Kalabińska M., Piłat J. „Ocena wybranych reologicznych właściwości betonów asfaltowych w warunkach obciążeń cyklicznych” Archiwum Inżynierii Lądowej, tom XXXV, zeszyt 1/1981
  - 2 Kalabińska M, Piłat J., Radziszewski P. „Materiały drogowe i nawierzchnie asfaltowe” Wydawnictwo dydaktyczne Politechniki Białostockiej i Politechniki Warszawskiej 1995 r.
  - 3 Sybilski D. "Ocena właściwości niskotemperaturowych lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych" Drogi i Mosty IBDiM, Warszawa 2/2004
  - 4 ASTM D 3497 – 97 (Reproved 1995) Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures
  - 5 Piłat J., Radziszewski P. "Nawierzchnie asfaltowe" WKŁ, Warszawa 2004 r.