



BOHDAN DOŁŻYCKI<sup>1)</sup>  
 MARIUSZ JACZEWSKI<sup>2)</sup>  
 CEZARY SZYDŁOWSKI<sup>3)</sup>  
 WOJCIECH BAŃKOWSKI<sup>4)</sup>  
 MARCIN GAJEWSKI<sup>5)</sup>

## ANALYSIS OF SELECTED MECHANICAL PROPERTIES OF MINERAL-CEMENT-EMULSION MIXTURES (MCE)<sup>6)</sup>

## ANALIZA WYBRANYCH CECH MECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-CEMENTOWO-EMULSYJNYCH (MCE)<sup>6)</sup>

**STRESZCZENIE.** W ostatnich latach mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne (MCE) stają się materiałem coraz częściej wykorzystywanym przy projektowaniu remontów i przebudów nawierzchni z wykorzystaniem recyklingu. Materiał ten zyskuje coraz większą popularność, ponieważ pozwala w sposób racjonalny i bez uszczerbku dla środowiska naturalnego ponownie wykorzystać materiały pochodzące z rozbiórki starych nawierzchni bitumicznych, w tym również materiały zawierające lepiszcze smołowe. Badanie podstawowych cech mieszank MCE, takich jak zawartość wolnych przestrzeni, wytrzymałość na pośrednie rozciąganie, czy też moduł sztywności pozwalają na określenie niezbędnego doziarnienia materiałem mineralnym oraz określenie ilości niezbędnych środków wiążących. Badania podstawowe na etapie opracowywania składu mieszanki MCE są wystarczające do określenia cech podstawowych, ale nie pozwalają na szerszą analizę zachowania badanego materiału, a w szczególności na ocenę jego przyszłej pracy w konstrukcji nawierzchni. W publikacji przedstawiono zaawansowane badania mieszanki MCE, które wykraczają poza badania uznane za standardowe i określają cechy mieszanki MCE istotne ze względu na pracę tego materiału w nawierzchni. Cechy, które określono dla lepszego poznania charakteru pracy mieszank MCE, to parametry mechaniki pęknięcia w badaniu zginania próbek półwałcowych SCB, moduły sztywności określone w aparacie SPT oraz charakterystyka zmęczeniowa mieszank MCE. Przeprowadzone badania pozwalają lepiej zrozumieć zachowanie mieszank MCE w nawierzchni oraz określić wnioski przydatne na etapie projektowania składów mieszank MCE.

**SŁOWA KLUCZOWE:** mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne, nawierzchnia drogowa, odporność na pęknięcie, podbudowa, recykling.

**ABSTRACT.** In recent years mineral-cement-emulsion (MCE) mixtures have been increasingly used in rehabilitation and reconstruction of pavements. The material gains popularity due to the fact that it enables rational and ecological reuse of reclaimed material from old bituminous pavements, including material containing tar binders. Testing of basic properties of mineral-cement-emulsion mixtures – such as air void content, indirect tensile strength or stiffness modulus – enables determination of the required proportion of added new aggregate and the content of binding agents used. While such tests are sufficient at the stage of MCE mixture design, they do not enable wider analysis of the behavior of the material – particularly of its future performance in pavement structure. This paper presents advanced testing of MCE mixtures, encompassing tests that reflect performance of the material in pavement. Properties that were determined in order to better understand the character of behavior of MCE mixtures included: fracture parameters in semi-circular bending (SCB) test, stiffness moduli in SPT device and fatigue characteristics. The performed tests provide better insight into behavior of MCE mixtures in pavement structures and enable formulation of useful conclusions for MCE mixture design.

DOI: 10.7409/rabdim.023.003

**KEYWORDS:** cracking resistance, mineral-cement-emulsion mixtures, recycling, road base, road pavement structure.

<sup>1)</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Transportowej, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; dolzycki@pg.edu.pl(✉)

<sup>2)</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Transportowej; mariusz.jaczewski@pg.edu.pl

<sup>3)</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Transportowej; cezary.szydowski@pg.edu.pl

<sup>4)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; wbankowski@ibdim.edu.pl

<sup>5)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mgajewski@ibdim.edu.pl

<sup>6)</sup> article co-edited by Prof. Wojciech Bańkowski and Prof. Jorge Pais, from the series of works under the common title: “Use of RAP in Road Engineering” as part of the Ministry of Education and Science project No. RCN/SP/0569/2021/1

artykuł współredagowany przez dr. hab. inż. Wojciecha Bańkowskiego, prof. IBDiM, oraz dr. inż. Jorge Paisa, prof. Uniwersytetu w Minho, z cyklu prac pod wspólnym tytułem „Wykorzystanie destruktu asfaltowego w budownictwie drogowym” w ramach projektu MEiN Nr RCN/SP/0569/2021/1

## 1. WSTĘP

W ostatnich latach recykling nawierzchni drogowych nabiera coraz większego znaczenia, a wraz z nim coraz popularniejszy staje się recykling głęboki na zimno. W ramach tych działań powstają między innymi mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne (MCE), które są coraz częściej wykorzystywane przy projektowaniu remontów i przebudów nawierzchni drogowych. Materiał ten zyskuje coraz większą popularność, ponieważ pozwala w sposób racjonalny i bez uszczerbku dla środowiska naturalnego ponownie wykorzystać materiały pochodzące z rozbiórki starych nawierzchni bitumicznych, w tym również materiały zawierające lepiszcze smołowe [1, 2]. O popularności recyklingu na zimno świadczą liczne polskie i zagraniczne publikacje [3-14], jak również wprowadzenie przez administrację drogową w Polsce wymagań ogólnokrajowych dla mieszanek MCE [15] oraz umieszczenie typowych rozwiązań dla nowych konstrukcji nawierzchni w Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [16].

Do dużej popularności technologii recyklingu na zimno, a w szczególności mieszanek MCE, przyczyniło się kilka ich zalet:

- minimalizacja ilości nowych materiałów potrzebnych do budowy dróg, co jest rozwiązaniem korzystnym ze względu na ochronę zasobów naturalnych oraz ograniczenie transportu;
- wykorzystanie materiałów pochodzących z rozbiórki, co w znacznym stopniu zmniejsza ilość odpadów do zagospodarowania, a tym samym przyczynia się do ochrony środowiska;
- powtórne wykorzystanie materiałów do budowy dróg w ostatecznym rozrachunku prowadzi do tańszej budowy dróg, co jest również istotnym elementem, brany pod uwagę przez inwestorów;
- na drogach obciążonych małym i średnim ruchem można wykorzystywać materiały powstałe w ramach recyklingu na zimno do nowych konstrukcji nawierzchni praktycznie bez ograniczeń, co pozwala na prowadzenie przebudów w sposób eliminujący powstawanie odpadów.

Wymienione czynniki należą do głównych powodów popularności technologii recyklingu na zimno, w tym technologii mieszanek MCE.

Dotychczasowa praktyka związana z badaniami mieszanek MCE sprowadzała się do określania podstawowych parametrów tego materiału, takich jak zawartość wolnych przestrzeni, wytrzymałość na pośrednie rozciąganie, czy też moduł sztywności. Takie badania pozwalają na określenie ilości materiałów mineralnych niezbędnych do uzyskania wymaganego

## 1. INTRODUCTION

Importance of road pavement recycling has been increasing recently. This includes deep cold recycling technologies and mineral-cement-emulsion (MCE) mixtures, which are increasingly implemented in road rehabilitation and reconstruction. MCE mixtures gain popularity due to the fact that they enable rational and ecological reuse of reclaimed material from old bituminous pavements, including material containing tar binders [1, 2]. Popularity of MCE mixtures is confirmed by numerous Polish and international publications [3-14], by introduction of national requirements for MCE mixtures by the Polish road administration [15] and by inclusion of typical solutions incorporating MCE mixtures in the Polish Catalog of Typical Flexible and Semi-Rigid Pavement Structures [16].

Cold recycling, and primarily the MCE mixture technology, owes its considerable popularity to several advantages, including:

- minimization of quantities of new materials needed for road construction, contributing to preservation of natural resources and reduction in demand for transportation;
- reuse of reclaimed material, leading to a significant reduction in waste for disposal and contributing to environment protection;
- reuse of road materials ultimately leads to a reduction in road construction costs, which is also an important factor for agencies and owners;
- on roads that carry low and medium traffic, materials obtained from cold recycling may be used in new pavement structures practically without limitations, enabling zero-waste reconstruction of road pavements.

The above factors belong to the primary reasons for the growing popularity of cold recycling, including the MCE mixture technology.

Thus far the practice of MCE testing was usually limited to determination of basic properties of mineral-cement-emulsion mixtures, such as air void content, indirect tensile strength or stiffness modulus. Such tests enable determination of the required proportion of added new aggregate and the content of binding agents used. While such tests are sufficient at the stage of MCE mixture design, they do not enable wider analysis of the behavior of the material, especially prediction of its future performance in pavement structure. It seems worthwhile to perform broader tests to gain better insight into behavior of MCE mixtures in pavement structures.



uziarnienia oraz określenie niezbędnych ilości środków wiążących. Wymienione badania na etapie opracowywania składu mieszanki MCE są wystarczające do określenia cech podstawowych, ale nie pozwalają na szerszą analizę zachowania się badanego materiału bezpośrednio po wbudowywaniu czy w trakcie eksploatacji nawierzchni, a w szczególności – na prognozowanie przyszłego zachowania mieszanek MCE w nawierzchni. Celowe wydaje się przeprowadzenie takich badań, które w lepszy sposób niż dotychczas odpowiedzą na pytanie, jak mieszanki MCE będą zachowywały się w konstrukcji nawierzchni.

## 2. CEL I ZAKRES BADAŃ

W niniejszej publikacji przedstawiono zaawansowane badania mieszanek MCE, które wykraczają poza badania uznane za podstawowe i określają cechy mieszanki MCE istotne ze względu na pracę tego materiału w nawierzchni. Celem badań, wykraczających poza standardowy zakres, była próba odpowiedzi na pytania dotyczące przyszłej pracy materiału w nawierzchni drogowej, a w szczególności:

- jaka jest jego odporność na pęknięcie?
- jak zmienia się sztywność materiału w zależności od warunków jego pracy?
- jaka jest jego trwałość zmęczeniowa?

Aby odpowiedzieć na zadane pytania przeprowadzono szereg badań, które należą do zaawansowanych badań drogowych i pozwalają na lepszy opis badanych materiałów. W badaniach tych, dla lepszego poznania charakteru pracy mieszanek MCE, określono następujące cechy badanego materiału:

- parametry mechaniki pęknięcia w badaniu zginania próbek półwałcowych SCB. Badania te pozwolą na określenie, jak na tle innych materiałów zachowują się mieszanki MCE i jaka jest ich odporność na powstawanie spękań w porównaniu z innymi materiałami;
- moduły sztywności określone w aparacie SPT. Badania te pozwolą z kolei na ocenę zachowania mieszanek MCE w zmieniających się warunkach pracy nawierzchni, a tym samym na uwzględnienie tych zmian w projektowaniu nawierzchni z podbudowami z mieszanek MCE;
- zmęczenie mieszanek MCE. Badania te pozwalają na ocenę zachowania się warstw z mieszanki MCE w trakcie eksploatacji nawierzchni i uwzględnianie tego zachowania w projektowaniu nawierzchni z podbudowami z mieszanek MCE.

Przeprowadzone badania pozwoliły na lepsze zrozumienie zachowania się mieszanek MCE w nawierzchni, a tym samym na lepsze projektowanie nawierzchni z podbudowami z mieszanek MCE.

## 2. THE AIM AND SCOPE OF THE RESEARCH

This paper presents advanced testing of MCE mixtures, encompassing tests that reflect performance of the material in pavement. The scope of the performed tests is not considered standard in typical MCE mixture testing. The aim of the research was to answer questions concerning the future performance of the mixture in road pavement, with particular emphasis on the following:

- what is its cracking resistance?
- how does the stiffness of the material change depending on service conditions?
- what is its fatigue life?

In order to answer the above questions, the authors performed a series of advanced tests, enabling better description of the material. The following properties were determined to provide better understanding of MCE mixture performance:

- parameters of fracture mechanics in semi-circular bending test (SCB). The tests enable comparisons between MCE mixtures and other materials in terms of their performance and cracking resistance;
- stiffness moduli determined in SPT device. The test enables evaluation of performance of MCE mixtures under changing conditions and incorporation of such changes in the design of pavements with MCE bases;
- fatigue of MCE mixtures. The test enables assessment of performance of MCE courses during pavement service and incorporation of performance in the design of pavements with MCE bases.

The performed tests provided better insight into behavior of MCE mixtures in pavement structures and enabled better design of pavements with MCE base courses.

## 3. TESTED MATERIALS

Tests were based on a typical MCE mixture designed for traffic categories KR3-KR4 in accordance with the requirements [15]. Composition of the mineral mixture is given in Table 1. Grading of the mineral components and the designed mixture is presented in Table 2. The given particle size distribution of the mineral mixture does not include the addition of cement.

The studied MCE mixtures were based on the designed mineral mixture with added bituminous emulsion C60B10 ZM/R and one of the two types of cement: CEM I 32.5/R or CEM II/B-V 32.5 R. All the tested MCE mixtures



### 3. MATERIAŁ DO BADAŃ

Do badań zaprojektowano typową mieszankę MCE dla ruchu KR3-KR4 zgodnie z wymaganiami [15]. Skład mieszanki mineralnej przedstawiono w Tabl. 1. Uziarnienie składników mineralnych oraz zaprojektowanej mieszanki podano w Tabl. 2. Podane uziarnienie mieszanki mineralnej nie uwzględnia dodatku cementu.

Table 1. The basic composition of the designed mineral mixture for use in the MCE mixture  
Tablica 1. Skład wyjściowy zaprojektowanej mieszanki mineralnej do mieszanki MCE

Component / Składnik	Content [%] (m/m) Udział procentowy
Reclaimed asphalt pavement Destrukt bitumiczny	70
Continuously-graded 0/31.5 mixture of crushed aggregate; granodiorite, GA85, $f_9$ Mieszanka kruszywo łamanych o ciągłym uziarnieniu 0/31,5; granodioryt, GA85, $f_9$	15
Fine 0/2 uncrushed aggregate; post-glacial aggregate, Gf85, $f_3$ Kruszywo drobne 0/2 niełamane; kruszywo polodowcowe, Gf85, $f_3$	15
Total / Suma	100

Do zaprojektowanej mieszanki mineralnej dodawano emulsję asfaltową C60B10 ZM/R oraz dwa rodzaje cementu: CEM I 32,5/R lub CEM II/B-V 32,5 R. Badania przeprowadzono dla takiej samej mieszanki mineralnej, zmieniano natomiast zawartość emulsji w zakresie od 2% do 6% oraz rodzaj i zawartość cementu w zakresie od 1% do 3%. Do badań zaawansowanych, opisanych w niniejszej pracy, wybrano następujące mieszanki:

- wariant C2E2, C2E4 i C2E6 z cementem CEM I 32,5 R (cement portlandzki),
- wariant C3E2, C3E4 i C3E6 z cementem CEM II/B-V 32,5 R (cement portlandzki popiołowy).

Znaczenie zastosowanych oznaczeń wariantów mieszanek jest następujące: C2, C3 – oznacza odpowiednio 2% lub 3% cementu; E2, E4, E6 – oznacza odpowiednio 2%, 4% lub 6% emulsji.

We wszystkich przypadkach dodano wodę, tak aby uzyskać wymaganą zawartość płynów na poziomie 7%. Zestawienie zastosowanych kombinacji środków wiążących przedstawiono w Tabl. 3, gdzie podano też podstawowe parametry poszczególnych mieszanek MCE. Ze względu na zastosowanie cementu popiołowego badania przeprowadzono również po 90 dniach od wykonania próbek.

contained the same mineral mixture; emulsion content and cement content varied, ranging from 2% to 6% and from 1% to 3%, respectively. The advanced tests described herein were performed on the following MCE mixtures:

- C2E2, C2E4 and C2E6 variants with CEM I 32.5 R (Portland cement),
- C3E2, C3E4 and C3E6 variants with CEM II/B-V 32.5 R (Portland fly ash cement).

The meaning of the adopted designations is as follows: C2, C3 – indicates 2% and 3% cement content, respectively; E2, E4, E6 – indicates 2%, 4% and 6% bituminous emulsion content, respectively.

Table 2. Grading of the mineral components and the designed mineral mixture  
Tablica 2. Uziarnienie składników mineralnych oraz zaprojektowanej mieszanki mineralnej

Sieve Sito # [mm]	Particle size distribution Uziarnienie				MCE grading envelope for traffic KR 3-4 [15] Uziarnienie graniczne mieszanki MCE dla KR 3÷4 [15]
	Reclaimed asphalt pavement 0/31.5 Destrukt bitumiczny 0/31,5	Mixture of crushed aggregates 0/31.5 Mieszanka kruszywo łamanych 0/31,5	Fine uncrushed aggregate 0/2 Kruszywo drobne niełamane 0/2	Mineral mixture Mieszanka mineralna	
63.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100
31.5	100.0	100.0	100.0	100.0	80-100
16.0	83.7	83.7	100.0	86.1	55-93
8.0	42.1	63.9	100.0	54.1	35-80
4.0	20.5	49.9	100.0	36.8	25-67
2.0	9.9	39.9	97.6	27.6	16-55
1.0	4.9	28.5	82.8	20.1	9-43
0.5	2.5	20.6	48.4	12.1	5-33
0.125	1.2	10.6	1.4	2.6	2-15
0.063	0.5	6.2	0.4	1.3	0-12

In all the cases water was added to obtain the required moisture content of 7%. The adopted combinations of binding agents and basic parameters of the MCE mixtures are given in Table 3. Due to the use of fly ash cement, tests were also performed 90 days after specimen preparation.

The presented results indicate relatively strong influence of the type of cement on MCE mixture parameters. Mixtures with CEM I 32.5 R reached the required parameters relatively early, while mixtures with CEM II/B-V 32.5 R still displayed considerably lower parameters, often below

W przedstawionych wynikach zaobserwowano dość duży wpływ rodzaju zastosowanego spoiwa na parametry mieszanki MCE. Mieszanka MCE z cementem CEM I 32,5 R osiągnęła dość szybko wymagane parametry, natomiast mieszanka MCE zawierająca cement CEM II/B-V 32,5 R charakteryzowała się parametrami o dużo mniejszych wartościach, często poniżej wymagań. Porównanie parametrów po 90 dniach przechowywania pokazało zbliżone wartości, zarówno dla modułów sztywności, jak i wytrzymałości na pośrednie rozciąganie.

Dla tak zaprojektowanych mieszanek przeprowadzono badania opisane w dalszej części publikacji. Badania przeprowadzono na próbkach starszych niż 90 dni.

the required values. However, after 90 days the values of the parameters – both the indirect tensile strength and the stiffness modulus – became comparable across mixtures with different cement types.

The designed MCE mixtures were subjected to advanced testing described in the following sections. Tests were conducted on specimens older than 90 days.

Table 3. Basic parameters of the tested MCE mixtures and test results obtained 7, 28 and 90 after specimen preparation  
Tablica 3. Podstawowe parametry badanych mieszanek MCE oraz wyniki badań po 7, 28 i 90 dniach od uformowania próbek

Designation Opis próbki	Air voids [%] Zawartość wolnych przestrzeni	Indirect tensile strength [MPa] Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie			Stiffness modulus [MPa] Moduł sztywności		
		after 7 days po 7 dniach	after 28 days po 28 dniach	after 90 days po 90 dniach	after 7 days po 7 dniach	after 28 days po 28 dniach	after 90 days po 90 dniach
MCE mixture with C60B10 ZM/R and CEM I 32.5 R / Mieszanka MCE z C60B10 ZM/R oraz CEM I 32,5 R							
C2E2	11.4	0.56	0.79	0.98	3849	5571	8817
C2E4	11.9	0.71	0.77	1.07	3999	6012	8177
C2E6	13.6	0.61	0.74	0.98	2427	3553	6141
MCE mixture with C60B10 ZM/R and CEM II/B-V 32.5 R / Mieszanka MCE z C60B10 ZM/R oraz CEM II/B-V 32,5 R							
C3E2	11.2	0.51	0.78	1.31	3646	6123	13110
C3E4	12.4	0.57	0.88	1.39	3397	6948	10286
C3E6	14.6	0.52	0.73	1.20	2277	4125	7645

## 4. PARAMETRY MECHANIKI PĘKANIA W BADANIU ZGINANIA PRÓBEK PÓŁWALCOWYCH SCB

### 4.1. UWAGI OGÓLNE

Badania odporności na pękanie wykonano na podstawie normy PN-EN 12697-44 [17]. Norma PN-EN bazuje na wyznaczeniu siłowego kryterium odporności na pękanie, czyli granicznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{IC}$ , na podstawie maksymalnej siły zarejestrowanej podczas zginania próbki. W celu dokładniejszej klasyfikacji badanych mieszanek wykorzystano dodatkowo kryterium energetyczne odporności na pękanie i wyznaczono krytyczną wartość całki  $J$ , która charakteryzuje prędkość uwalniania energii odkształcenia podczas propagacji spękania [18].

### 4.2. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK

Próbki zostały zagęszczone w prasie żyrotorowej wg PN-EN 12697-31 [19] do osiągnięcia wskaźnika zagęszczenia około 99% w stosunku do próbek Marshalla. W pierwszym etapie zagęszczono próbki żyrotorowe o średnicy 150 mm i wysokości 105 mm. Z tak przygotowanych próbek żyrotorowych wycięto próbki półwalcowe (ang. *semi circular beam*, SCB)

## 4. FRACTURE MECHANICS PARAMETERS IN SEMI-CIRCULAR BENDING (SCB) TEST

### 4.1. GENERAL REMARKS

Cracking resistance was investigated in accordance with the PN-EN 12697-44 standard [17]. The PN-EN standard is focused on the force-based fracture toughness criterion, i.e. the critical stress intensity factor  $K_{IC}$ , calculated from the maximum force registered during specimen bending. In order to classify the tested mixtures more precisely, the energy-based cracking resistance was used as an additional criterion. The critical value of the  $J$  integer was determined, providing a measure of the rate of energy dissipation during propagation of the crack [18].

### 4.2. SPECIMEN PREPARATION

Specimens were compacted in a gyratory press in accordance with PN-EN 12697-31 [19], until the density of approx. 99% of Marshall density was achieved. The gyratory specimens were first compacted to the diameter of 150 mm and height of 105 mm. Such cylindrical specimens were then cut into semi-circular samples with the



o średnicy  $150 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , wysokości  $75 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$  i grubości  $50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . Z każdej cylindrycznej próbki żyratorowej wycięto zatem cztery półwałcowe próbki badawcze. W celu inicjacji spękania na spodzie każdej próbki wykonano nacięcia o szerokości 2 mm oraz głębokości 10 mm, 20 mm lub 30 mm. Proces przygotowania próbek testowych pokazano na Rys. 1.

diameter of  $150 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , height of  $75 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$  and thickness of  $50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . Therefore, four semi-circular test specimens were obtained from each cylindrical gyratory specimen. In order to initiate cracking, 2-mm-wide notches were cut in the bottom surfaces of the specimens; notch depths varied and equaled 10 mm, 20 mm or 30 mm. The procedure of test specimen preparation is shown in Fig. 1.

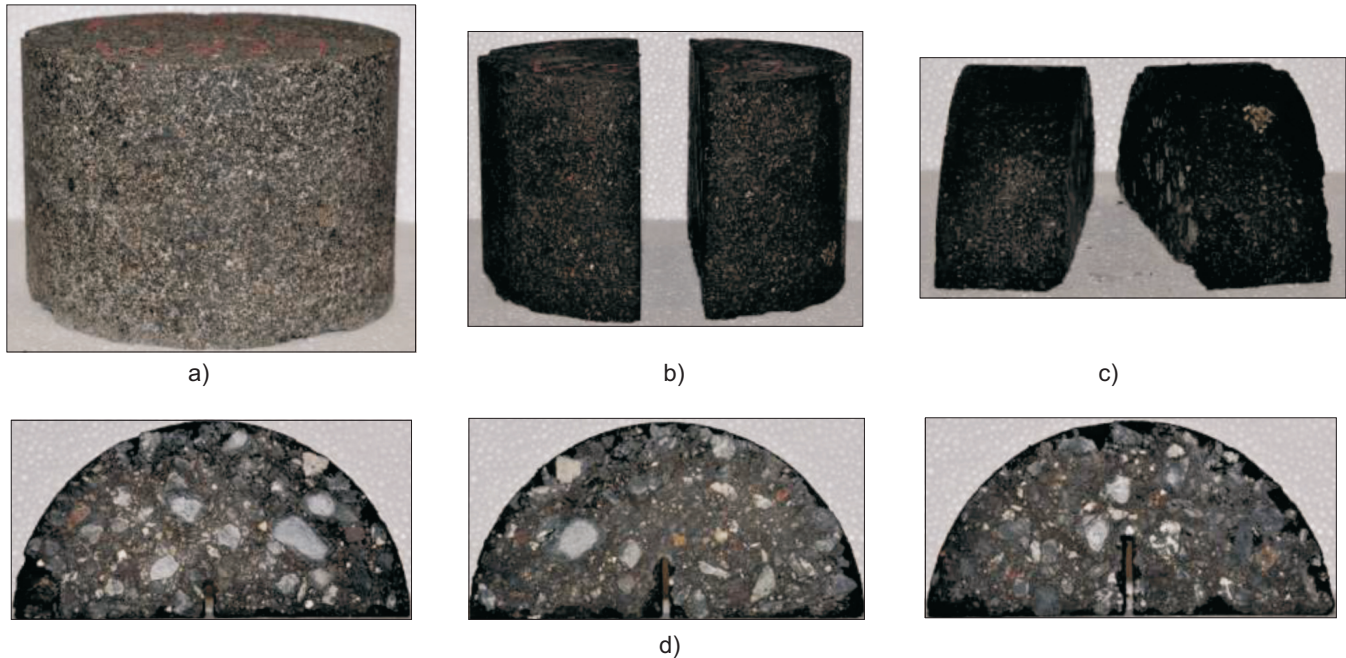


Fig. 1. The procedure of specimen preparation: a) cylindrical specimen compacted in a gyratory press to the diameter of 150 mm and height of 105 mm; b) and c) consecutive cuts with a blade saw, d) semi-circular beams with notches of 10 mm, 20 mm and 30 mm in depth

Rys. 1. Proces przygotowania próbki badawczej: a) zagęszczanie w prasie żyratorowej próbki o średnicy 150 mm i wysokości 105 mm, b) i c) kolejność wycinania próbek półwałcowych przy pomocy piły tarczowej; d) próbki półwałcowe z nacięciami o głębokości 10 mm, 20 mm i 30 mm

### 4.3. METODYKA BADAŃ

Badania odporności na pękanie przeprowadzono w prasie o stałej prędkości przesuwu tłoka, wyposażonej w czujnik do pomiaru przemieszczeń pionowych oraz w komorę termostatyczną do utrzymywania zadanej temperatury badania. Badania zinterpretowano przy zastosowaniu podstawowych pojęć mechaniki pękania [20, 21]. Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń  $K_{IC}$ , zwany odpornością na pękanie, wyznaczono zatem ze wzoru:

$$K_{IC} = \sigma_0 \cdot Y_I \cdot \sqrt{\pi \cdot a}, \quad (1)$$

w którym:  $a$  to głębokość nacięcia,  $\sigma_0$  to naprężenie maksymalne podczas badania, zaś  $Y_I$  to znormalizowany współczynnik intensywności naprężeń w typie  $I$  obciążenia szczeliny. Naprężenia maksymalne podczas zginania próbki obliczono z zależności [17]:

### 4.3. TEST METHODS

Fracture toughness tests were performed in a press with constant displacement rate. The device was fitted with vertical displacement sensor and a thermostatic chamber that enabled maintenance of the adopted test temperature. The results were interpreted using the basic principles of fracture mechanics [20, 21]. The critical stress intensity factor  $K_{IC}$ , also referred to as “fracture toughness”, was determined from:

$$K_{IC} = \sigma_0 \cdot Y_I \cdot \sqrt{\pi \cdot a}, \quad (1)$$

where:  $a$  is the notch depth,  $\sigma_0$  is the maximum strain during the test, and  $Y_I$  is the normalized stress intensity factor for the  $I$  type of notch loading. The maximum stress during the test was calculated as [17]:

$$\sigma_0 = \frac{F}{2 \cdot r \cdot B}, \quad (2)$$

gdzie:  $F$  to maksymalna siła podczas badania,  $r$  to promień próbki, natomiast  $B$  to grubość próbki. Występujący we wzorze (1) znormalizowany współczynnik intensywności naprężeń zależy od kształtu i wymiarów charakterystycznych próbki w odniesieniu do kształtu i charakteru propagującego pęknięcia [21]. Jego wartość można wyznaczyć doświadczalnie albo przy zastosowaniu metod numerycznych, z których najczęściej stosowaną jest metoda elementów skończonych. Dla próbek półwałcowych o stosunku połowy rozpiętości belki do średnicy próbki równym 0,8 wartość znormalizowanego współczynnika intensywności naprężeń wyznaczono ze wzoru [22]:

$$Y_I = 4,782 - 1,219 \cdot \left(\frac{a}{r}\right) + 0,063 \exp\left[7,045 \cdot \left(\frac{a}{r}\right)\right], \quad (3)$$

w którym:  $a$  to głębokość nacięcia, zaś  $r$  to promień próbki. Krytyczną wartość całki  $J$  charakteryzującą prędkość uwalniania energii odkształcenia podczas propagacji pęknięcia wyznaczono, określając zależność pomiędzy zmianą długości nacięcia próbki a zmianą energii odkształcenia, mierzoną do momentu zniszczenia próbki. Krytyczną wartość całki Rice'a  $J_c$  wyznaczono ze wzoru:

$$J_c = -\left(\frac{1}{B}\right) \frac{dU}{da}, \quad (4)$$

gdzie:  $U$  to energia odkształcenia do zniszczenia próbki,  $a$  to głębokość nacięcia,  $B$  grubość próbki, natomiast  $dU/da$  to zmiana energii odkształcenia ze zmianą głębokości nacięcia. Aby wyznaczyć zmianę energii odkształcenia wraz ze zmianą głębokości nacięcia, badania przeprowadzono na próbkach z różną głębokością szczeliny inicjującej, która wynosiła 10 mm, 20 mm i 30 mm. Wszystkie badania wykonano w temperaturze  $+10^\circ\text{C}$  z prędkością przesuwu pionowego wynoszącą 1 mm/min. Widok próbki przygotowanej do badania przedstawiono na Rys. 2.

#### 4.4. WYNIKI BADAŃ

Na Rys. 3 przedstawiono przykładowe zależności siły  $F$  w funkcji przemieszczenia  $d$  oraz wykresy zmiany energii odkształcenia otrzymane dla mieszanki MCE C2E2 CEM I 32.5 R. Warto zauważyć, że rozrzut wyników jest na umiarkowanym poziomie, co w przypadku badań mieszanek MCE nie jest często spotykane (Rys. 3a-c). Na Rys. 3d zamieszczono wartości

$$\sigma_0 = \frac{F}{2 \cdot r \cdot B}, \quad (2)$$

where:  $F$  is the maximum force registered during the test,  $r$  is the radius of the specimen, and  $B$  is the thickness of the specimen. The normalized stress intensity factor found in equation (1) depends on the shape and characteristic dimensions of the sample and their relation to the shape and character of the propagating crack [21]. Its values may be determined experimentally or calculated using numerical methods, the most popular among which is the finite element method. For semi-circular specimens, whose ratio of half of beam span vs. specimen radius equaled 0.8, the normalized stress intensity factor was determined from the following formula [22]:

$$Y_I = 4.782 - 1.219 \cdot \left(\frac{a}{r}\right) + 0.063 \exp\left[7.045 \cdot \left(\frac{a}{r}\right)\right], \quad (3)$$

where:  $a$  is the depth of the notch and  $r$  is the radius of the specimen. The critical value of integer  $J$ , characterizing the rate of strain energy dissipation during propagation of the crack, was determined by analyzing the relationship between the change in the notch depth and the change in strain energy to specimen failure. The critical value of the Rice integer  $J_c$  was calculated from:

$$J_c = -\left(\frac{1}{B}\right) \frac{dU}{da}, \quad (4)$$

where:  $U$  is the strain energy to specimen failure,  $a$  is the depth of the notch,  $B$  is the thickness of the specimen, and  $dU/da$  is the change in strain energy with the change in notch depth. In order to determine the change in strain energy with the change in the notch depth, tests were performed on specimens with different notch depths: 10 mm, 20 mm and 30 mm. All the tests were conducted at the temperature of  $+10^\circ\text{C}$  and vertical displacement rate of 1 mm/min. A specimen mounted in the test device is shown in Fig. 2.

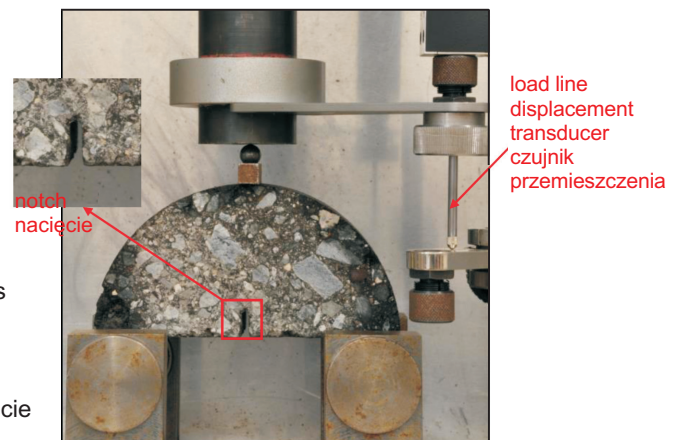


Fig. 2. An SCB specimen prepared for fracture toughness testing, with visible displacement  $d$  transducer and a close-up of the notch

Rys. 2. Widok próbki SCB przygotowanej do badania odporności na pęknięcie ze zbliżeniem na wykonane nacięcie oraz wyjaśnieniem sposobu pomiaru przemieszczenia  $d$

energii odkształcenia potrzebnej do zniszczenia próbki w zależności od głębokości jej nacięcia. W kolejnym kroku uzyskane wyniki zostały aproksymowane funkcją liniową, której współczynnik kierunkowy jest bazą do wyznaczenia całki Rice'a  $J_C$ .

#### 4.4. TEST RESULTS

Fig. 3 shows example plots of the loading force  $F$  as a function of displacement  $d$  and a plot of changes in strain energy for the MCE C2E2 CEM I 32.5 R mixture. It is noteworthy that scatter of the results is moderate (Fig. 3a-c), which is not observed frequently in the case of MCE mixtures. Fig. 3d shows the relationship between the strain energy to specimen failure and the depth of the notch. The obtained results were subsequently approximated using a linear function, whose slope served as the basis for determination of the Rice integer  $J_C$ .

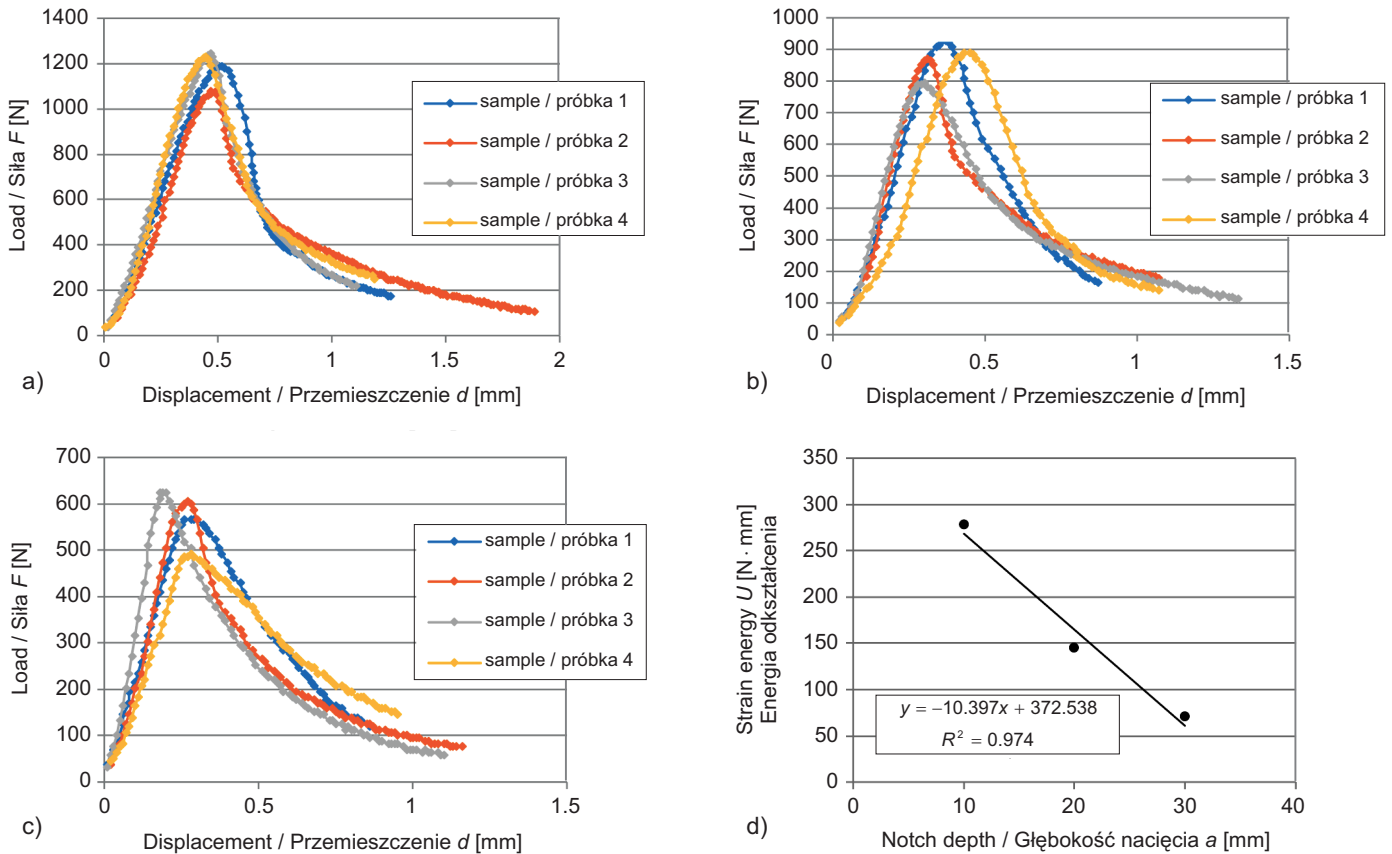


Fig. 3. Results of cracking resistance testing for the C2E2 CEM I 32.5 R mixture – plots of loading force as a function of displacement for specimens with notch depths of: a) 10 mm, b) 20 mm, c) 30 mm, d) change in strain energy with the change in notch depth  
Rys. 3. Wyniki badań odporności na pęknięcie mieszanki C2E2 CEM I 32,5 R – wykres siły w funkcji przemieszczenia próbek z nacięciem o głębokości: a) 10 mm, b) 20 mm, c) 30 mm; d) zmiana energii odkształcenia w stosunku do zmiany głębokości nacięcia

Na Rys. 4-6 zestawiono otrzymane średnie wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężeń wraz z odchyleniem standardowym, natomiast na Rys. 7 – krytyczną wartość całki  $J_C$ .

The obtained mean values and standard deviations of critical stress intensity factor are shown in Figs 4-6. Critical values of the  $J_C$  integer are given in Fig. 7.





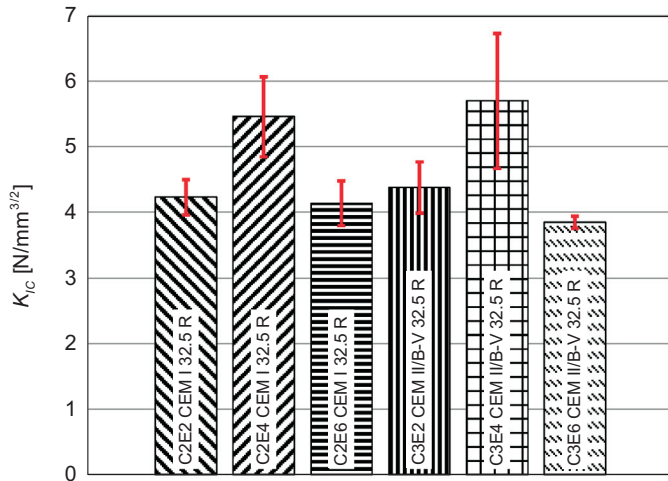


Fig. 4. Comparison of fracture toughness for the notch depth of  $a = 10$  mm

Rys. 4. Zestawienie parametru odporności na pęknięcie  $K_{IC}$  dla głębokości nacięcia  $a = 10$  mm

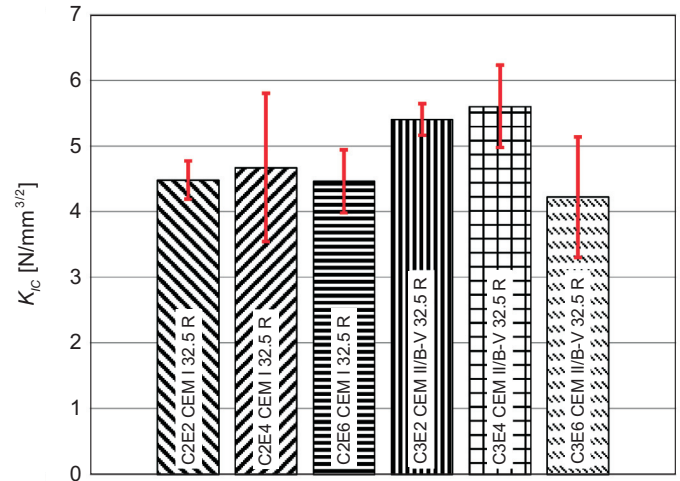


Fig. 5. Comparison of fracture toughness for the notch depth of  $a = 20$  mm

Rys. 5. Zestawienie parametru odporności na pęknięcie  $K_{IC}$  dla głębokości nacięcia  $a = 20$  mm

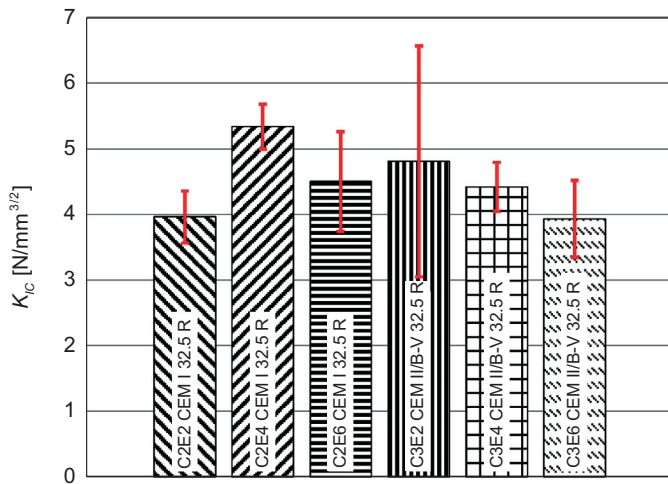


Fig. 6. Comparison of fracture toughness for the notch depth of  $a = 30$  mm

Rys. 6. Zestawienie parametru odporności na pęknięcie  $K_{IC}$  dla głębokości nacięcia  $a = 30$  mm

#### 4.5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ PĘKANIA

Na podstawie przeprowadzonych analiz parametrów mechaniki pęknięcia mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych sformułowano następujące wnioski ogólne:

1. Nie stwierdzono w badanych mieszankach wpływu zawartości emulsji asfaltowej ani rodzaju cementu na parametry odporności na pęknięcie  $K_{IC}$ . Było to dość zaskakujące, ponieważ zarówno różnice w zawartości składników, jak i rodzaj cementu wskazywały wyraźny wpływ na zmianę cech

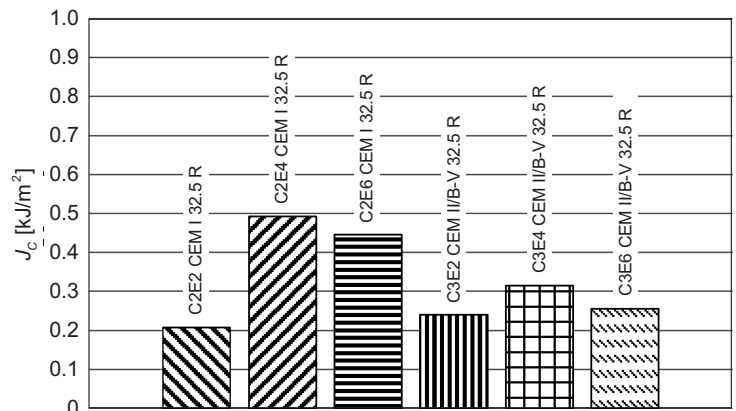


Fig. 7. Comparison of cracking resistance parameter  $J_C$

Rys. 7. Zestawienie parametru odporności na pęknięcie  $J_C$

#### 4.5. ANALYSIS OF THE RESULTS OBTAINED IN CRACKING RESISTANCE TESTING

The following general conclusions were formulated based on the performed analyses of fracture mechanics parameters of mineral-cement-emulsion mixtures:

1. No influence of bituminous emulsion content or cement type was noted for fracture toughness  $K_{IC}$  of the tested mixtures. This fact was rather surprising, since both the differences in composition and cement type displayed considerable influence on the basic properties of the

mieszanki MCE. Nie udało się znaleźć przyczyny takiego zachowania mieszanki MCE w tym badaniu.

2. W przypadku całki Rice'a  $J_C$  nie stwierdzono wpływu wartości emulsji na zmianę tego parametru. Zaobserwowano natomiast wpływ rodzaju cementu na wartość parametru  $J_C$ . Mieszanki zawierające cement CEM II/B-V 32,5R charakteryzowały się wyraźnie mniejszymi wartościami parametru  $J_C$  niż mieszanki MCE zawierające cement CEM I 32,5R. Mogło to być spowodowane wolniejszym procesem wiązania w mieszankach MCE z cementem CEM II/B-V 32,5R, jednakże, co ciekawe, nie stwierdzono takiej zależności w przypadku parametru odporności na pękanie  $K_{IC}$ . Może to świadczyć o większej wrażliwości kryterium energetycznego na zmianę cech materiału w porównaniu do kryterium siłowego.
3. Analizując wyniki zamieszczone na Rys. 4-7 można stwierdzić, że z pewnością dla każdej mieszanki istnieje najlepsza proporcja zawartości cementu i emulsji. Wyraźnie widać, że dla składów C2E4 i C3E4 niemal we wszystkich przypadkach wartości  $K_{IC}$  oraz  $J_C$  przyjmują najwyższą wartość.

## 5. OKREŚLENIE MODUŁÓW SZTYWNOŚCI MIESZANEK MCE W APARACIE SPT

### 5.1. METODYKA BADAŃ

Badanie modułu dynamicznego wykonano w oparciu o procedurę zawartą w NCHRP Report 614 [23]. Badanie modułu dynamicznego polegało na osiowym obciążaniu próbki walcowej siłą pionową o przebiegu haversinusoidalnym o zadanych częstotliwościach. Dokonywano pomiaru odkształceń średnich przy pomocy 3 czujników przemieszczenia LVDT zamontowanych na poboczniczy próbki walcowej w rozstawie co  $120^\circ$ . Widok próbki podczas badania modułu dynamicznego przedstawiono na Rys. 8. Wartościami mierzonymi w badaniu były: dynamiczny moduł sztywności oraz kąt przesunięcia fazowego. Częstotliwości obciążenia zadawane przez urządzenie wynosiły: 25 Hz, 20 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 2 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,2 Hz, 0,1 Hz i 0,01 Hz. Pomiar dynamicznego modułu sztywności oraz kąta przesunięcia fazowego wykonywany był w 3 temperaturach:  $+4^\circ\text{C}$ ;  $+20^\circ\text{C}$  i  $+40^\circ\text{C}$ . Zgodnie z wytycznymi badanie w częstotliwości 0,01 Hz wykonano tylko dla najwyższej temperatury. Dla każdej temperatury przebadano po 3 próbki walcowe.

Badania dynamicznego modułu sztywności wykonywano w celu uzyskania charakterystyki mieszaneek w postaci krzywych wiodących. Do wyznaczenia równania krzywej

MCE mixtures. The cause of such behavior of the MCE mixture in this test has not been identified.

2. In the case of the Rice integer  $J_C$ , no influence of emulsion content was observed. However, it was noted that cement type affected the values of the  $J_C$  parameter. Mixtures containing CEM II/B-V 32.5R cement displayed noticeably lower  $J_C$  values than mixtures containing CEM I 32,5R cement. This may have been caused by the slower binding that occurred in the MCE mixtures CEM II/B-V 32.5R. Interestingly, analogous relationship was not observed in the case of fracture toughness  $K_{IC}$ . This fact may indicate that the energetic criterion is more sensitive to changes in material characteristics than the force-based criterion.
3. Based on the analysis of Figs 4-7, it may be stated that for each mixture there certainly does exist the optimum proportion of cement and emulsion. It is visible that in nearly all the cases  $K_{IC}$  and  $J_C$  display the greatest values for compositions C2E4 and C3E4.

## 5. DETERMINATION OF STIFFNESS MODULI OF THE MCE MIXTURES IN SPT DEVICE

### 5.1. TEST METHODS

Dynamic modulus was investigated based on the procedure presented in the NCHRP Report 614 [23]. Determination of the dynamic modulus consisted in cyclic haversine loading of cylindrical specimens with axial vertical force at preset frequencies. Strains were registered using three LVDT sensors mounted on the side surface of the specimen at  $120^\circ$  from each other. A specimen during dynamic modulus testing is shown in Fig. 8. The values determined in the test were dynamic stiffness modulus and phase angle. The preset load frequencies applied by the device equaled: 25 Hz, 20 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 2 Hz, 1 Hz, 0.5 Hz, 0.2 Hz, 0.1 Hz and 0.01 Hz. The values of dynamic stiffness modulus and phase angle were determined at three temperatures:  $+4^\circ\text{C}$ ,  $+20^\circ\text{C}$  and  $+40^\circ\text{C}$ . In accordance with the guidelines, testing at the frequency of 0.01 Hz was performed only at the highest temperature. Three cylindrical specimens were tested per each temperature.

Dynamic stiffness modulus tests were performed in order to obtain master curves characterizing the mixtures. Equations describing the dynamic modulus master curves were determined based on the following formula [24]:



wiodącej (ang. *master curve*) dla dynamicznego modułu sztywności skorzystano ze wzoru [24]:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{(Max - \delta)}{1 + e^{\beta + \gamma \left\{ \log f + \frac{\Delta E_a}{19,14714} \left[ \left( \frac{1}{T} \right) - \left( \frac{1}{T_r} \right) \right] \right\}}}, \quad (5)$$

gdzie:

- $|E^*|$  – dynamiczny moduł sztywności [MPa],
- $Max$  – maksymalny moduł ograniczający krzywą wiodącą [MPa],
- $f$  – częstotliwość obciążenia w temperaturze badania [Hz],
- $T_r$  – temperatura referencyjna [K],
- $T$  – temperatura badania [K],
- $\Delta E_a$  – energia aktywacji (traktowana jako parametr dopasowania krzywej),

$\delta, \beta, \gamma$  – parametry dopasowania krzywej.

Do wyznaczenia krzywej wiodącej wykorzystano średnie dynamiczne moduły sztywności uzyskane z badań wykonanych w 3 temperaturach. Jako temperaturę referencyjną przyjęto 20°C.

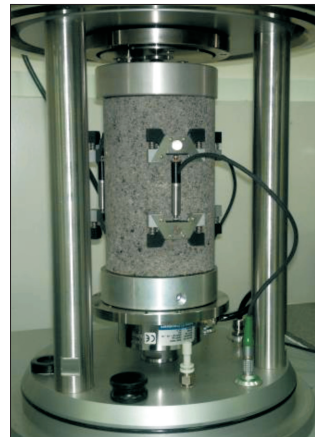


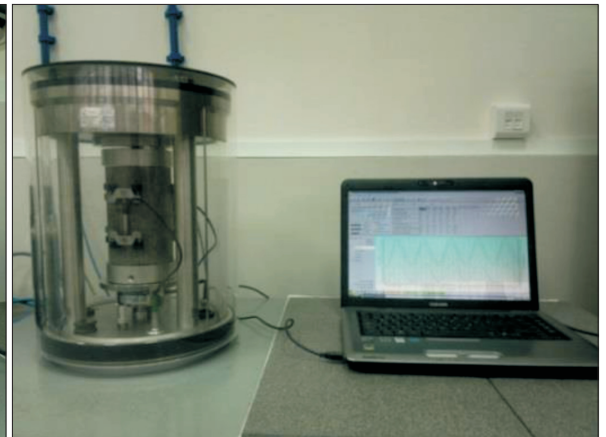
Fig. 8. Specimen prepared for dynamic modulus testing  
Rys. 8. Widok próbki przygotowanej do badania modułu dynamicznego

$$\log|E^*| = \delta + \frac{(Max - \delta)}{1 + e^{\beta + \gamma \left\{ \log f + \frac{\Delta E_a}{19,14714} \left[ \left( \frac{1}{T} \right) - \left( \frac{1}{T_r} \right) \right] \right\}}}, \quad (5)$$

where:

- $|E^*|$  – dynamic stiffness modulus [MPa],
- $Max$  – the maximum modulus; the master curve does not exceed this value [MPa],
- $f$  – load frequency at test temperature [Hz],
- $T_r$  – reference temperature [K],
- $T$  – test temperature [K],
- $\Delta E_a$  – activation energy (treated as fitting parameter),
- $\delta, \beta, \gamma$  – fitting parameters.

Each master curve was determined based on mean values of dynamic stiffness modulus obtained at three test temperatures. The adopted reference temperature equaled 20°C.



## 5.2. WYNIKI BADAŃ

Przy zawartości cementu na poziomie 2% badane mieszanki uzyskiwały moduły maksymalne w zakresie 7000-7500 MPa, a w przypadku 3% – rzędu 7500-8000 MPa. Dodatek emulsji asfaltowej wpływa na zmniejszenie sztywności mieszanki oraz na podwyższenie jej zachowania lepkiego – średnio dodatek 2% emulsji asfaltowej obniża moduł  $|E^*|$  o około 500 MPa oraz podwyższa maksymalną wartość kąta przesunięcia fazowego  $\varphi$  o około 5°. Zestawienie wpływu zawartości poszczególnych środków wiążących przedstawiono na Rys. 9 i 10.

## 5.2. TEST RESULTS

Mixtures containing 2% of cement displayed maximum moduli in the range of 7000-7500 MPa, and mixtures with 3% cement content – in the range of 7500-8000 MPa. Addition of bituminous emulsion provides a reduction in mixture stiffness and an increase in its viscous behavior; on average, an increase in bituminous emulsion content by 2% reduces the  $|E^*|$  modulus by about 500 MPa and increases the maximum value of phase angle  $\varphi$  by about 5°. Comparisons of the influence of content of binding agents used are presented in Figs 9 and 10.



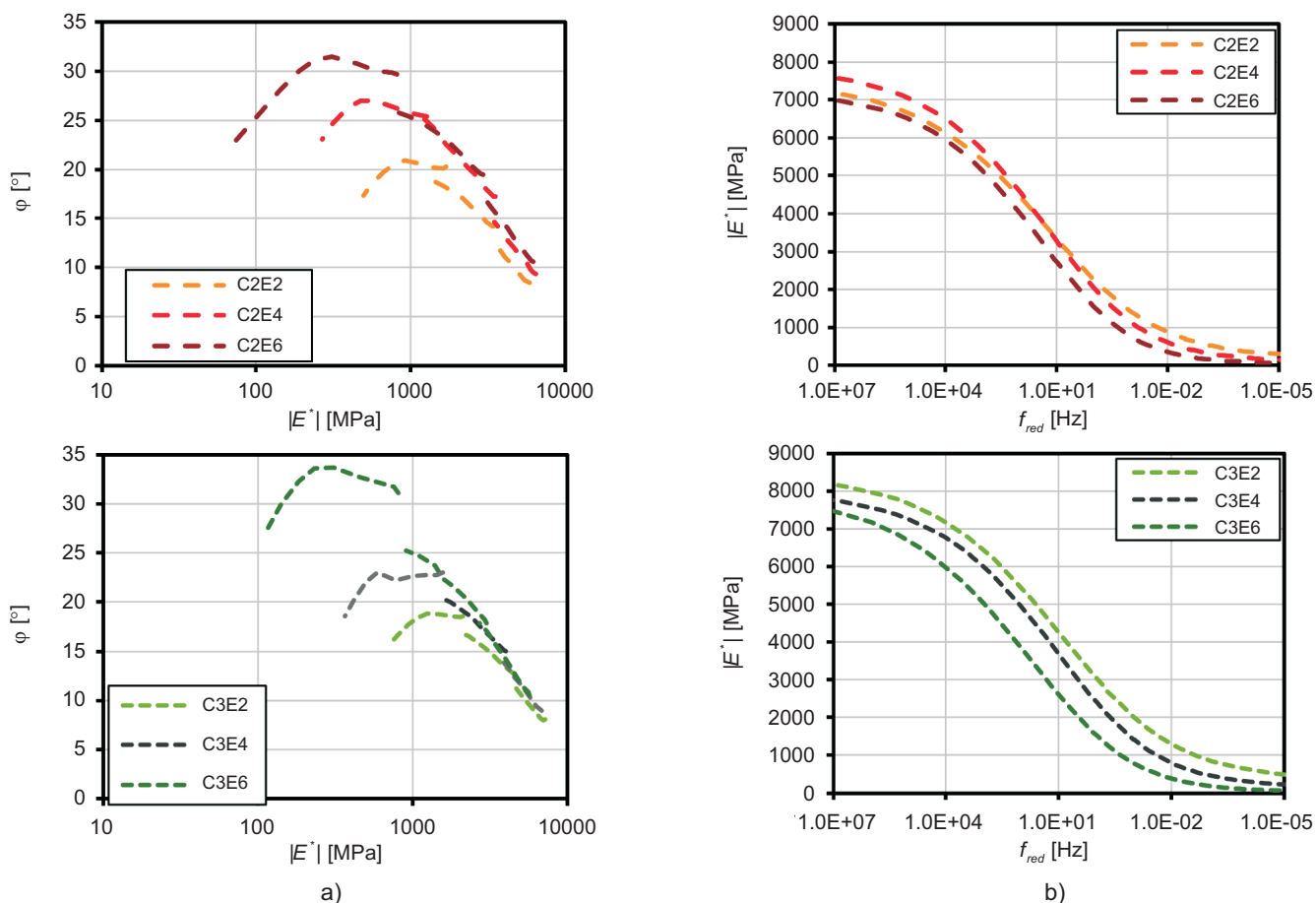


Fig. 9. Comparison of: a) Black diagrams and b) master curves (model according to NCHRP 9-29: PP 02,  $T_{ref} = 20^{\circ}\text{C}$ ) for mixtures containing 2% and 3% of cement;  $f_{red}$  means reduced frequency

Rys. 9. Porównanie: a) krzywych Blacka oraz b) krzywych wiodących (model wg NCHRP 9-29: PP 02,  $T_{ref} = 20^{\circ}\text{C}$ ) dla mieszanek zawierających 2% i 3% cementu;  $f_{red}$  oznacza częstotliwość zredukowaną

W przypadku zawartości emulsji asfaltowej na poziomie 2% lub 4% uzyskane wyniki badań mieszczą się w typowych zakresach notowanych w literaturze – od 250 MPa do 8000 MPa. Widoczny jest także wyraźny wpływ wiązań hydraulicznych – wyższa zawartość cementu skutkuje wyższą wartością modułu  $|E^*|$  – przy czym już w przypadku zawartości emulsji asfaltowej równej 4% wpływ wiązań bitumicznych zaczyna dominować. Maksymalne kąty przesunięcia fazowego oraz minimalne wartości modułów  $|E^*|$  uzyskują odpowiednie wartości, pozwalające na uniknięcie nadmiernych uszkodzeń warstwy wykonywanej z mieszanki MCE. W przypadku zawartości emulsji asfaltowej na poziomie 6% wiązania bitumiczne, przy średnich zawartościach cementu, zaczynają dominować w mieszance. Jak widać na Rys. 10, przebiegi krzywych wiodących dla temperatur średnich i wysokich praktycznie pokrywają się. Różnicę stanowi jedynie przebieg w temperaturze około  $4^{\circ}\text{C}$ , gdy asfalt znajdujący się w emulsji zaczyna przejawiać coraz mniej cech lepkosprężystych, przechodząc w stan sprężysty. W tym przypadku zaczyna

In the case of mixtures with 2% or 4% bituminous emulsion content, the obtained results lie within the ranges typically reported in the literature – between 250 MPa and 8000 MPa. The influence of hydraulic bonds is also very clear – higher cement content provides greater  $|E^*|$  modulus. However, in the case of 4% bituminous emulsion content it is observable that the impact of bituminous bonds becomes dominant. Maximum phase angles and minimum  $|E^*|$  moduli display advantageous values that enable avoidance of excessive distress of an MCE mixture base course. In the case of 6% bituminous emulsion content, bituminous bonds are dominant at average cement contents. As visible in Fig. 10, master curves in mid- and high-temperature ranges practically overlap. The only differences are observable at temperatures around  $4^{\circ}\text{C}$ , when the bitumen from the emulsion displays less viscoelastic properties and becomes elastic; hydraulic bonds become dominant and the maximum values of stiffness moduli depend only on cement content. At the

dominować wiązanie hydrauliczne i wartości maksymalnych modułów sztywności zależą wyłącznie od zawartości cementu. W temperaturze 40°C kąty przesunięcia fazowego  $\phi$  znacząco rosną, osiągając wyniki zbliżone do wartości charakterystycznych dla mieszanek mineralno-asfaltowych, przy czym wartości modułu  $|E^*|$  znacząco spadają dla większych zawartości (6%) emulsji asfaltowej i stanowią odpowiednio około 1/5 i 1/2 wartości uzyskiwanych dla zawartości emulsji asfaltowej równej 2% i 4%.

temperature of 40°C, phase angles  $\phi$  increase considerably, reaching values that are close to typical phase angles of asphalt mixtures; however, at greater bituminous emulsion contents (6%) the values of  $|E^*|$  modulus decrease considerably – to 1/5 and 1/2 of values observed for 2% and 4% bituminous emulsion content, respectively.

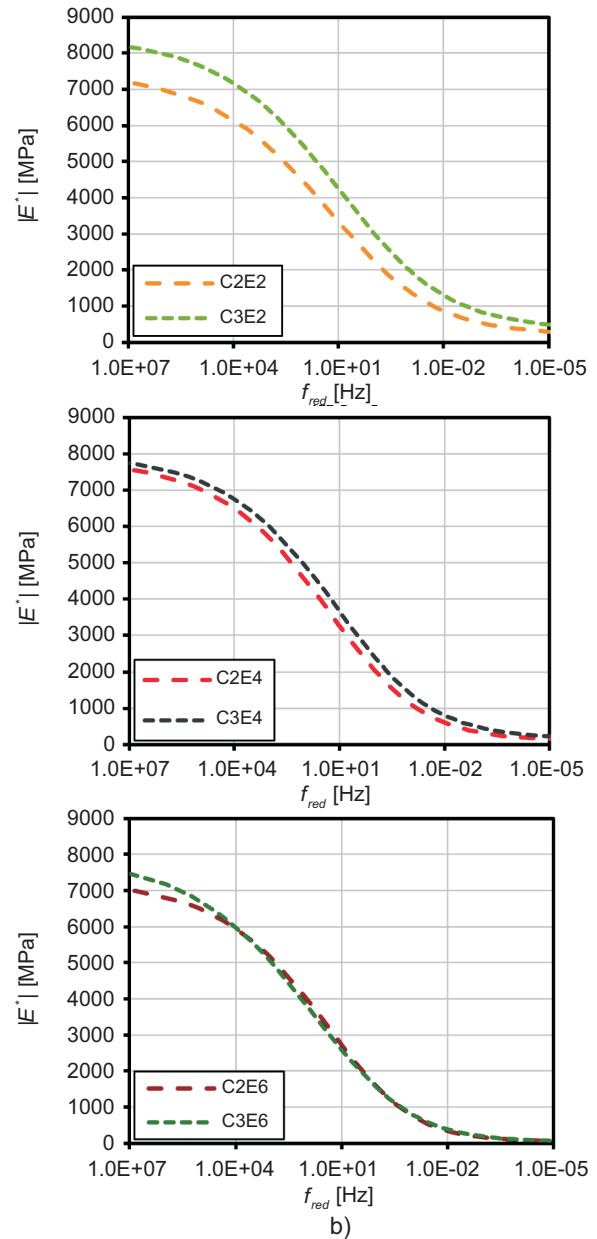
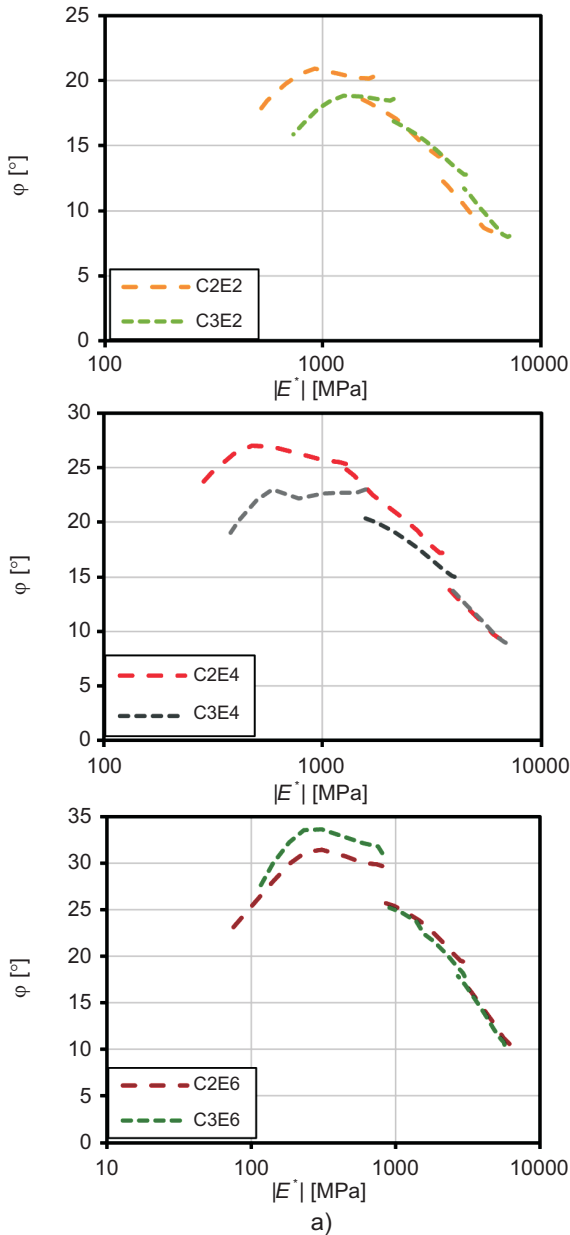


Fig. 10. Comparison of: a) Black diagrams and (b) master curves (model according to NCHRP 9-29: PP 02,  $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$ ) for mixtures containing 2%, 4% and 6% of bituminous emulsion;  $f_{red}$  means reduced frequency

Rys. 10. Porównanie: a) krzywych Blacka oraz b) krzywych wiodących (model wg NCHRP 9-29: PP 02,  $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$ ) dla mieszanek zawierających 2%, 4%, 6% emulsji asfaltowej;  $f_{red}$  oznacza częstotliwość zredukowaną

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych sugeruje się więc ograniczenie zawartości emulsji w mieszankach MCE do poziomu maksymalnie 4%, szczególnie przy zmniejszonych zawartościach cementu.

## 6. OKREŚLENIE CHARAKTERYSTYK ZMĘCZENIOWYCH ANALIZOWANYCH MIESZANEK MCE

### 6.1. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK

Do badań wytypowano dwie serie próbek różniące się rodzajem zastosowanego cementu oraz ilością dodanej emulsji. Zestawienie wszystkich analizowanych wariantów podano w Tabl. 2. W każdej serii przygotowano minimum 12 próbek o kształcie walca o średnicy 100 mm i wysokości około 175 mm. Ostatecznie do badań w przypadku niektórych mieszank zakwalifikowana została mniejsza liczba próbek; odrzucono próbki których powierzchnie podstawy były szczególnie nierówne. Probki zostały zagęszczone w prasie żyratorowej wg PN-EN 12697-31 [19], a następnie poddane kondycjonowaniu w normowych warunkach temperatury i wilgotności. Probki zostały przyklejone podstawami do stalowych krążków. W celu zagwarantowania równości podstaw i przyczepności do podłoża powierzchnia podstaw próbek została wyrównana przez wypełnienie klejem. Na przygotowanych próbkach umocowano trzy ekstensometry o bazach pomiarowych 115 mm, rozmieszczone co 120° na poboczniczy walca w kierunku jego osi (Rys. 11). Przed wykonaniem badania próbki były termostatowane przez co najmniej 4 h w temperaturze badania, tj. 10°C.

### 6.2. METODYKA BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH

Badanie zmęczenia na próbkach cylindrycznych jest jedną z metodą badania mieszank mineralno-asfaltowych [24]. Ogólnie schemat obciążenia jest taki sam jak w przypadku badania modułu dynamicznego omówionego w rozdziale 5.1. Metoda polega na cyklicznym (sinusoidalnym, o częstotliwości 5 Hz) obciążaniu próbki poprzez nadanie górnemu uchwytni maszyny przemieszczenia  $u(t)$  w postaci funkcji widocznej na Rys. 12a. Przemieszczeniu towarzyszy reakcja w postaci siły o charakterystycznym przebiegu, jak na Rys. 12b. W celu zwiększenia dokładności pomiaru odkształcenie próbki jest mierzone przez trzy ekstensometry, a następnie uśredniane. Badanie wykonywane jest na stanowisku badań wytrzymałościowych MTS wyposażonym w prasę hydrauliczną, system sterowania i zbierania danych oraz komorę termiczną, która umożliwia utrzymanie temperatury 10°C w trakcie testu. Analizując schematyczny wykres siły reakcji na zadane wymuszenie przemieszczeniowe, wyróżnić można trzy charakterystyczne fazy badania zmęczenia w próbie jednoosiowego

Based on the performed laboratory tests, it is suggested that the content of bituminous emulsion in MCE mixtures be limited to a maximum of 4%, especially at low cement contents.

## 6. DETERMINATION OF FATIGUE CHARACTERISTICS OF THE ANALYZED MCE MIXTURES

### 6.1. SPECIMEN PREPARATION

Two series of specimens, differing in the type of cement used and the content of bituminous emulsion, were selected for fatigue testing. Comparison of all the analyzed variants is shown in Table 2. Each series consisted of at least 12 cylindrical specimens with the diameter of 100 mm and height of approx. 175 mm. Ultimately, in the case of some mixtures, less specimens were qualified for testing, as certain specimens displayed excessive unevenness of their base surfaces. Specimens were compacted in a gyratory press in accordance with PN-EN 12697-31 [19], and subsequently conditioned at the standard temperature and humidity. Specimen bases were glued to steel disks. In order to guarantee evenness and adhesion of the bases, any cavities in their surfaces were filled with adhesive. Each specimen was fitted with three extensometers with 115 mm gauge length, mounted vertically on the side surface of the cylinder at 120° from each other (Fig. 11). Before testing the specimens were conditioned at the test temperature (10°C) for at least 4 hours.



Fig. 11. Specimen fitted with extensometers and mounted in the loading device inside the thermostatic chamber Rys. 11. Widok przygotowanej próbki umieszczonej w komorze termostatującej i zamocowanej w uchwytach maszyny wytrzymałościowej wraz z czujnikami odkształceń

### 6.2. TEST METHODS

Testing of fatigue on cylindrical specimens belongs to the methods typically used for asphalt mixtures [24]. The

odkształcenia (Rys. 12b). W fazie początkowej minimalna wartość siły jest zbliżona do zera. W drugiej fazie minimalna wartość siły zwiększa się (co do wartości bezwzględnej) podczas kolejnych cykli wymuszenia przemieszczeniowego. W fazie trzeciej odpowiedź materiału stabilizuje się, siła zmienia się między wartościami w przybliżeniu stałymi (siłą ściskającą a siłą rozciągającą).

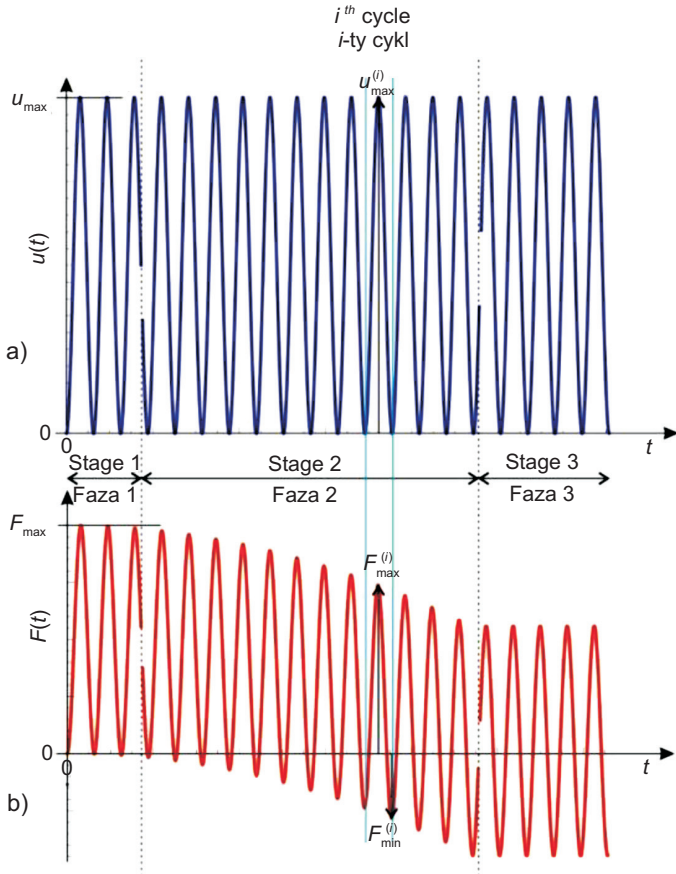


Fig. 12. A schematic plot of the changing values:  
a) forced displacement  $u(t)$ , b) reaction force  $F(t)$   
Rys. 12. Schematyczny przebieg impulsów:  
a) przemieszczeniowego wymuszenia  $u(t)$ , b) siły reakcji  $F(t)$

### 6.3. WYNIKI I ANALIZA PRZEPROWADZONYCH BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH

Prezentowane w Tabl. 4 wyniki dotyczą tzw. siecznych modułów sztywności na początku fazy 1 procesu zmęczenia próbek MCE, wyznaczonych wg wzoru [23]:

$$E_0^s = \frac{F_{\max}^{(i)}}{A} \frac{h}{u_{\max}^{(i)}}, \quad (6)$$

gdzie:

- $u_{\max}^{(i)}$  – wartość maksymalnego przemieszczenia w  $i$ -tym (początkowym) cyklu (należy pamiętać, że  $u_{\min}^{(i)}=0$ ),
- $F_{\max}^{(i)}$  – wartość maksymalna siły w  $i$ -tym (początkowym) cyklu,

general loading scheme is the same as the one used in dynamic modulus testing and described in section 5.1. The test consists in cyclic loading (sine wave, frequency of 5 Hz) of the specimen by forcing displacement  $u(t)$  of the upper grip of the device according to the function shown in Fig. 12a. The material responds to the displacement with reaction force, whose values change in a characteristic manner, as shown in Fig. 12b. In order to enhance measurement accuracy, specimen strain was measured using three extensometers and then averaged. The test was performed in an MTS station equipped with hydraulic press, control/data acquisition system and thermal chamber, enabling maintenance of the temperature at 10°C throughout the test. Based on the plot of reaction to the forced uniaxial displacement, three distinct stages of the test may be identified (Fig. 12b). In the initial stage the minimum value of force is close to zero. In the second stage the minimum force increases (in terms of its absolute value) with consecutive displacement cycles. In the third stage the response of the material stabilizes, with the extreme values of force (compressive and tensile) becoming practically constant.

### 6.3. FATIGUE TEST RESULTS AND ANALYSIS

The results shown in Table 4 pertain to the so-called secant stiffness moduli at the beginning of the first stage of fatigue testing, determined based on the following equation [23]:

$$E_0^s = \frac{F_{\max}^{(i)}}{A} \frac{h}{u_{\max}^{(i)}}, \quad (6)$$

where:

- $u_{\max}^{(i)}$  – maximum displacement in the  $i$ -th (initial) cycle (note that  $u_{\min}^{(i)}=0$ ),
- $F_{\max}^{(i)}$  – maximum force in the  $i$ <sup>th</sup> (initial) cycle,
- $A$  – specimen cross-section area,

$A$  – powierzchnia przekroju próbki,

$h$  – specimen height

$h$  – wysokość próbki.

Table 4. Detailed results of the initial secant stiffness moduli in fatigue tests  $E_0^s$  [MPa]

Tablica 4. Szczegółowe wyniki wartości początkowych siecznych modułów sztywności w badaniach zmęczenia [MPa]

Specimen No. Nr próbki	Initial secant stiffness moduli / Wartości początkowych siecznych modułów sztywności $E_0^s$ [MPa]					
	C2E2 CEM I	C2E4 CEM I	C2E6 CEM I	C3E2 CEM II	C3E4 CEM II	C3E6 CEM II
1	2526	2914	1335	2207	2544	1803
2	2461	1540	1848	2690	3159	2414
3	2449	2042	1975	1658	3129	1987
4	1361	2009	2005	2637	2991	2283
5	3105	1056	2342	3072	2202	2452
6	1479	1015	2026	2477	2106	1954
7	1090	1701	1936	2413	2963	1749
8	2742	1603	1918	3289	2220	2188
9	2115	2167	1479	1819	2713	2653
10	2390	1542	1818	3500	–	1820
11	2926	830	1786	3122	–	1919
12	–	1112	2249	–	–	2200
13	–	–	–	–	–	1674
Mean / Średnia	2240	1627	1893	2626	2586	2084
Deviation / Odchylenie	660	594	281	590	475	304
Median / Mediana	2449	1572	1927	2637	2629	1987

Jako że w celu zwiększenia dokładności pomiaru zastosowano ekstensometry o bazie  $l_g = 115$  mm, we wzorze (6) zamiast  $h$  należy podstawić  $l_g$ , zaś zamiast  $u_{\max}^{(i)}$  podstawić średni odczyt z trzech ekstensometrów, tj.  $u_{\max E}^{(i)}$ . We wszystkich przypadkach założenie o małych odkształceniach jest spełnione, a uzyskane dla CEM I 32,5 R i CEM II/B-V 32,5 R wyniki poddane obróbce statystycznej zamieszczono na Rys. 13. Należy zwrócić uwagę na dość znaczny rozrzut wyników w przypadku mieszanek MCE z różnymi zawartościami emulsji i różnymi cementami.

Porównując wyniki zaprezentowane na Rys. 13 dla mieszanek z cementem CEM I 32,5 R, nie można stwierdzić wpływu zwiększania ilości emulsji na wartości początkowe siecznego modułu sztywności. Z kolei w przypadku mieszanek wyprodukowanych przy użyciu CEM II/B-V 32,5 R taki wniosek można sformułować, ponieważ zwiększanie ilości emulsji z 4% do 6% powoduje zmniejszanie wartości początkowego siecznego modułu sztywności (nawet o ponad 20% w przypadku wartości średnich). Można dodatkowo zauważyć, że w przypadku zastosowania cementu CEM II/B-V 32,5 R wartości modułów dla odpowiadających sobie zawartości emulsji przyjmują wyższe wartości niż w przypadku zastosowania CEM I 32,5 R.

Since three extensometers with gauge length of  $l_g = 115$  mm were used,  $h$  in equation (6) should be substituted with  $l_g$ , and  $u_{\max}^{(i)}$  should be substituted with the mean reading from three extensometers, i.e.  $u_{\max E}^{(i)}$ . In all the cases the small strain assumption was valid; the results obtained for mixtures with CEM I 32.5 R and CEM II/B-V 32.5 R after statistical processing are shown in Fig. 13. It should be noted that dispersion of the results for MCE mixtures with various emulsion contents and cement types was considerable.

Comparing the results presented in Fig. 13 for mixtures with CEM I 32.5 R, no relationship between the emulsion content and the obtained initial secant stiffness moduli may be noted. However, in the case of mixtures with CEM II/B-V 32.5 R, one may formulate the conclusion that emulsion content does affect initial moduli, since an increase in emulsion content from 4% to 6% caused a visible decrease in the initial secant stiffness modulus (even by 20% in terms of mean values). It may be also observed that when CEM II/B-V 32.5 R cement was used the initial moduli were greater than for mixtures with CEM I 32.5 R at the same emulsion content.





Moduł sieczny  $E^s$  w badaniu zmęczeniowym jest wyznaczany w funkcji liczby cykli. Jako kryterium zmęczeniowe przyjęto warunek, że zniszczenie zmęczeniowe materiału zachodzi, gdy wartość modułu siecznego spadnie o 50%. Dla każdej z mieszanek wykonywano badania przy różnych wartościach maksymalnego odkształcenia. We wszystkich przypadkach najczęściej badań wykonano przy odkształceniu maksymalnym  $\varepsilon = \frac{u_{\max E}}{l_{E_s}} = 130 \mu\text{m/m}$ . Na Rys. 14 przedstawiono średnie wartości trwałości zmęczeniowych przy tej wartości odkształcenia. Analizując przedstawione rezultaty można stwierdzić, że trwałość zmęczeniowa zależy wprost proporcjonalnie od zawartości emulsji. Jednocześnie mieszanki z CEM II/B-V 32,5 R przy tej samej zawartości emulsji charakteryzują się większą trwałością zmęczeniową niż mieszanki z CEM I 32,5 R.

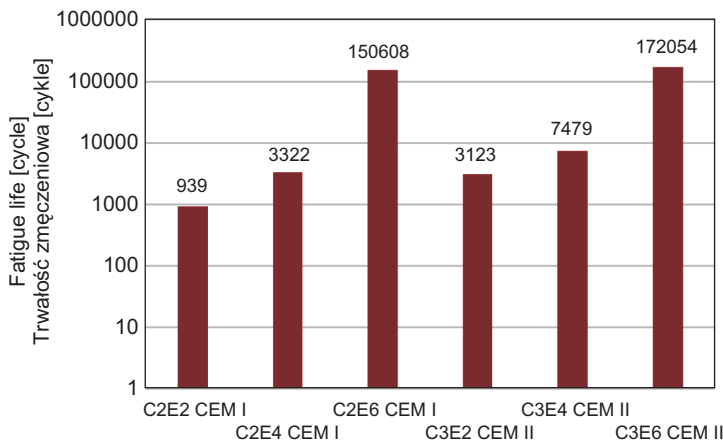


Fig. 14. Comparison of fatigue life of MCE mixtures at the maximum strain of  $130 \mu\text{m/m}$

Rys. 14. Porównanie trwałości zmęczeniowej mieszanek MCE przy odkształceniu  $130 \mu\text{m/m}$

Na Rys. 15 i 16 zamieszczono tzw. charakterystyki zmęczeniowe (krzywe Wöhlera), które stanowią aproksymacje wyników badań zmęczeniowych uzyskanych przy różnych wartościach amplitudy odkształcenia wg funkcji określonej wzorem:

$$N_{50}(\varepsilon) = a \cdot \varepsilon^{-b}, \quad (7)$$

w którym  $a$  i  $b$  to parametry równania wyznaczone metodą regresji liniowej (Tabl. 5). W przypadku mieszanek MCE z cementem CEM I 32,5 R poszczególne linie układają się kolejno nad sobą i są niemal równoległe. Na tej podstawie można sformułować wniosek, że zwiększenie ilości emulsji poprawia właściwości zmęczeniowe mieszanki. W przypadku mieszanek z cementem CEM II/B-V 32,5 R można sformułować podobny wniosek co do wpływu zawartości emulsji, jednak różnice między poszczególnymi mieszankami są już mniejsze, szczególnie przy zawartości emulsji 2% i 4%.

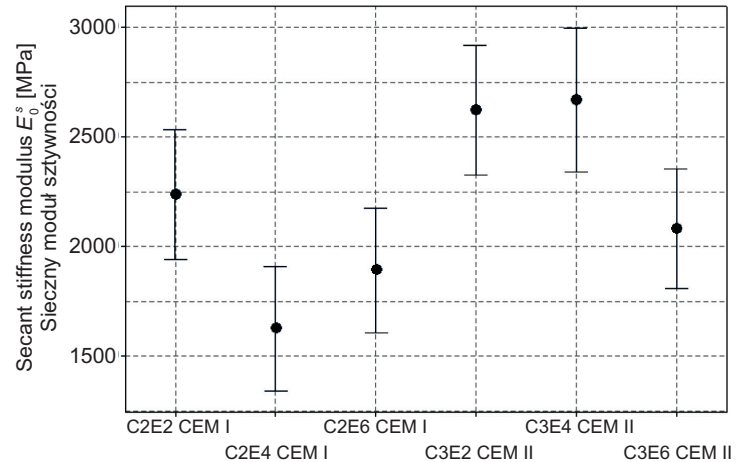


Fig. 13. The initial secant stiffness modulus  $E_0^s$  with 95% confidence intervals marked

Rys. 13. Porównanie wartości początkowej siecznego modułu sztywności  $E_0^s$  z zaznaczeniem przedziału ufności 95%

Secant modulus  $E^s$  was determined in the fatigue test as a function of the number of load cycles. The cycle in which the secant modulus decreased to 50% of its initial value was adopted as the point of fatigue failure. Each mixture was tested using various values of maximum strain. The greatest number of test trials for each case was performed at the maximum strain of  $\varepsilon = \frac{u_{\max E}}{l_{E_s}} = 130 \mu\text{m/m}$ . Mean

values of fatigue life at this strain level are shown in Fig. 14. The results indicate that fatigue life is directly proportional to bituminous emulsion content. At the same time, mixtures with CEM II/B-V 32.5 R display greater fatigue life than mixtures with CEM I 32,5 R at the same emulsion content.

Figs 15 and 16 present fatigue characteristics of the material in the form of Wöhler curves; they comprise approximations of fatigue life results obtained at various strain amplitudes, determined according to the equation:

$$N_{50}(\varepsilon) = a \cdot \varepsilon^{-b}, \quad (7)$$

where  $a$  and  $b$  are regression parameters (Table 5). In the case of mixtures with CEM I 32.5 R cement, individual plots are located above each other and are almost parallel. This fact warrants the conclusion that an increase in emulsion content improves fatigue properties of the mixture. In the case of mixtures with CEM II/B-V 32.5 cement, similar conclusion regarding the effect of emulsion content may be formulated, but the differences in fatigue life are less pronounced, especially between mixtures with 2% and 4% emulsion content.

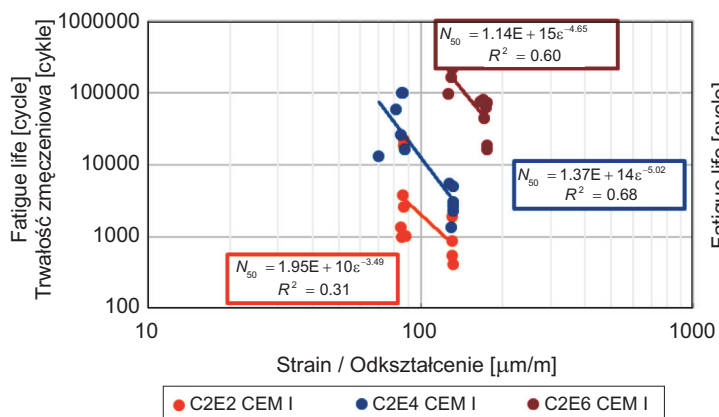


Fig. 15. Fatigue characteristics of MCE mixtures with CEM I 32.5 R cement and various emulsion content  
Rys. 15. Charakterystyki zmęczeniowe mieszanek MCE z cementem CEM I 32,5 R i różną zawartością emulsji

Dodatkowo w Tabl. 5 zamieszczono wartości parametru  $\varepsilon_6$ , tzn. odkształcenia, przy którym trwałość zmęczeniowa danej mieszanki wynosi 1 mln cykli. Wartość tego odkształcenia wyznaczono z uzyskanych aproksymacji, zakładając, że są one uprawnione. Analiza wartości parametru  $\varepsilon_6$  pokrywa się z wnioskami przedstawionymi w zakresie analizy charakterystyk zmęczeniowych i trwałości przy odkształceniu 130  $\mu\text{m/m}$ .

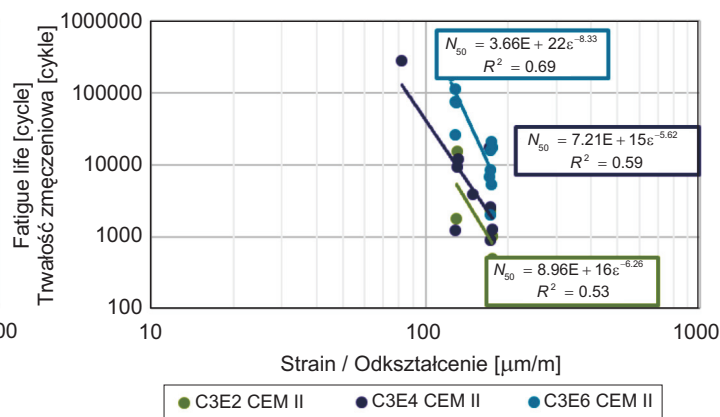


Fig. 16. Fatigue characteristics of MCE mixtures with CEM II/B-V 32.5 R cement and various emulsion content  
Rys. 16. Charakterystyki zmęczeniowe mieszanek MCE z cementem CEM II/B-V 32,5 R i różną zawartością emulsji

The strain at which fatigue life of a given mixture equals 1 million cycles,  $\varepsilon_6$ , was determined as an additional parameter and presented in Tabl. 5. Value of strain corresponding to fatigue life of 1 million cycles was determined from the obtained approximate fatigue characteristics, under assumption that the approximations are valid. Analysis of  $\varepsilon_6$  values is consistent with the observations reported above for fatigue characteristics and fatigue life at the strain of 130  $\mu\text{m/m}$ .

Table 5. Regression parameters based on fatigue test results of MCE mixtures and values of  $\varepsilon_6$  under assumption that the approximations are valid  
Tablica 5. Parametry aproksymacji wyników badań zmęczenia próbek MCE oraz wartość  $\varepsilon_6$  przy założeniu, że dana aproksymacja obowiązuje

Mixture / Mieszanka	$R^2$	$a$	$b$	$\varepsilon_6$ [ $\mu\text{m/m}$ ]
C2E2 CEM I	0.31	$1.95 \cdot 10^{10}$	3.49	12
C2E4 CEM I	0.68	$1.37 \cdot 10^{14}$	5.02	42
C2E6 CEM I	0.60	$1.14 \cdot 10^{15}$	4.65	89
C3E2 CEM II	0.53	$8.96 \cdot 10^{16}$	6.26	56
C3E4 CEM II	0.59	$7.21 \cdot 10^{15}$	5.62	57
C3E6 CEM II	0.69	$3.66 \cdot 10^{22}$	8.33	97

Analizując wyniki badań zmęczeniowych należy zwrócić uwagę na znaczne rozrzuty wyników, co jest widoczne na wykresach charakterystyk zmęczeniowych; wskazują na to również relatywnie niskie współczynniki determinacji  $R^2$ . Tak znaczne rozrzuty wyników są charakterystyczne m.in. w przypadku mieszanek mineralno-asfaltowych gruboziarnistych. W przypadku mieszanek MCE efekt jest podobny, co może wynikać z problemów związanych z wyrównywaniem powierzchni próbek. Jako przyczynę należy również wskazać potencjalnie większą niejednorodność mieszanek związaną

When analyzing the results of fatigue tests, one should note the considerable scatter of the results, which is visible in plots of fatigue characteristics and relatively low coefficients of determination  $R^2$ . Such dispersion of results is typical of, among others, coarse asphalt mixtures. In the case of MCE mixtures, the effect is similar and may result from issues with evenness of test specimen bases. Another possible cause is the potentially greater inhomogeneity of the mixtures arising from usage of reclaimed asphalt pavement material. Despite the noted scatter, the influence of

z zastosowaniem destruktu asfaltowego. Pomimo dużych rozrzutów wyniki badań zmęczeniowych są zgodne z oczekiwaniami w zakresie wpływu ilości emulsji. Większa ilość lepiszcza asfaltowego w mieszance MCE poprawia trwałość zmęczeniową, podobnie jak w mieszankach mineralno-asfaltowych.

## 7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzane badania mieszanek MCE pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Badany materiał wykazuje bardzo zróżnicowane i skomplikowane właściwości reologiczne, mechaniczne oraz zmęczeniowe. Jego zachowanie umiejscawia go pomiędzy materiałami sprężystymi a lepkosprężystymi.
2. Zachowanie mieszanek MCE zależy bardzo mocno od kompozycji zastosowanych środków wiążących. W przypadku większej zawartości cementu materiał przejawia dominację wiązań hydraulicznych i staje się bardziej sprężysty, w przypadku większej zawartości asfaltu pochodzącego z emulsji przejawia dominację wiązań bitumicznych i staje się bardziej lepkosprężysty.
3. W badaniu odporności na pękanie nie stwierdzono w badanych mieszankach wpływu zawartości emulsji asfaltowej ani rodzaju cementu na parametry odporności na pękanie  $K_{IC}$ . W przypadku parametru  $J_C$  nie stwierdzono wpływu zawartości emulsji na jego zmianę. Zaobserwowano natomiast wpływ rodzaju cementu na wartość  $J_C$ .
4. Badania modułów sztywności wykazały, że materiał ten jest bardziej podatny niż mieszanki mineralno-asfaltowe. Wartości modułów sztywności są co najmniej o połowę niższe niż te uzyskiwane dla mieszanek mineralno-asfaltowych. W badaniach zaobserwowano większy wpływ emulsji na uzyskiwane właściwości reologiczne badanych mieszanek, szczególnie kąta przesunięcia fazowego (w niektórych przypadkach różnica pomiędzy skrajnymi składami mieszanek wynosiła nawet 15°). Wpływ cementu, zarówno na moduł sztywności, jak i na kąt przesunięcia fazowego, jest dużo mniejszy. Same tendencje zmian cech reologicznych są zgodne z wcześniejszymi obserwacjami dokonanymi na innych materiałach bazowych.
5. W badaniach zmęczenia mieszanek MCE stwierdzono znaczny wpływ zawartości emulsji na trwałość zmęczeniową tego materiału. Wraz ze wzrostem zawartości asfaltu pochodzącego z emulsji trwałość zmęczeniowa rośnie.
6. Analizując wyniki badań mieszanki MCE należy zwrócić uwagę na znaczne rozrzuty uzyskiwanych parametrów. Stwierdzone rozrzuty są naturalnym zjawiskiem

emulsion content on the parameters observed in the fatigue tests is in agreement with expectations. Greater content of bituminous binder in the MCE mixture improves its fatigue life, as is the case with asphalt mixtures.

## 7. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The tests performed on MCE mixtures enable formulation of the following conclusions:

1. The investigated material displays very varied and complicated rheological, mechanical and fatigue properties. Based on its behavior, it may be classified as intermediate between elastic and viscoelastic materials.
2. Behavior of MCE mixtures strongly depends on the proportions of binding agents used. In the case of greater cement content, the material displays domination of hydraulic bonds and becomes more elastic; in the case of greater content of bitumen originating from emulsion, the material displays domination of bituminous bonds and becomes more viscoelastic.
3. In the cracking resistance tests no influence of bituminous emulsion content or cement type was noted for fracture toughness  $K_{IC}$  of the tested mixtures. In the case of the  $J_C$  parameter, no influence of emulsion content was observed. However, it was noted that cement type affected the values of  $J_C$ .
4. Stiffness modulus tests indicated that MCE mixtures are less stiff than asphalt mixtures. The obtained stiffness moduli of MCE mixtures were lower than typical stiffness moduli of asphalt mixtures by at least 50%. Greater influence of emulsion content on rheological properties was observed, especially on phase angle (in some cases the difference between extreme mixture compositions reached 15°). Influence of cement – both on stiffness modulus and phase angle – was much lower. The general tendencies of changes in rheological properties are consistent with previous observations for different base materials.
5. Considerable influence of emulsion content on fatigue life of MCE mixtures was observed in fatigue tests. An increase in content of bitumen originating from emulsion improves fatigue life of the mixture.
6. When analyzing the results of fatigue tests, one should note the considerable scatter of the obtained parameters. Such dispersion of results is natural in the case of MCE mixtures, which are a coarse material consisting primarily of relatively inhomogeneous reclaimed asphalt pavement. This characteristic property of MCE



w przypadku mieszanki MCE, czyli materiału gruboziarnistego, składającego się w większości z mało jednorodnego destruktu pochodzącego ze starej nawierzchni. Jest to cecha charakterystyczna i należy ją brać pod uwagę przy ocenie wyników badań tego materiału.

## INFORMACJE DODATKOWE

Badania były wykonane w zakresie realizacji projektu RID-1A „Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu” finansowanego przez Krajowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w ramach wspólnego przedsięwzięcia „Rozwój Innowacji Drogowych”.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Dołżycki B., Jaskuła P.: Review and evaluation of cold recycling with bitumen emulsion and cement for rehabilitation of old pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, **6**, 4, 2019, 311-323, DOI: 10.1016/j.jtte.2019.02.002
- [2] Chomicz-Kowalska A., Stepien J.: Cost and eco-effective cold in-place recycled mixtures with foamed bitumen during the reconstruction of a road section under variable load bearing capacity of the subgrade. *Procedia Engineering* **161**, 2016, 980-989, DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.837
- [3] Firlej S., Kukielka J.: Load bearing capacity of a national road with base course made of mineral-cement-emulsion mixture after 12 years of exploitation. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **18**, 3, 2019, 211-226, DOI: 10.7409/rabdim.019.014
- [4] Iwański M., Mazurek G., Buczyński P., Iwański M.M.: Effects of hydraulic binder composition on the rheological characteristics of recycled mixtures with foamed bitumen for full depth reclamation. *Construction and Building Materials*, **330**, 2022, ID article: 127274, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127274
- [5] Trykoz L., Rezunenکو M., Pustovoitova O., Semenova-Kulish V., Borodin D.: Water absorption kinetics of bitumen modified cement mortars. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **21**, 2, 2022, 167-178, DOI: 10.7409/rabdim.022.010
- [6] Mazurek G., Iwański M., Buczyński P., Horodecka R.: Influence of innovative three-element binder on permanent deformations in recycled mixtures with emulsion and foamed bitumen. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **21**, 55, 2021, DOI: 10.1007/s43452-021-00192-9
- [7] Bocci M., Grilli A., Cardone F., Graziani A.: A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials. *Construction and Building Materials* **25**, 2, 2011, 773-778, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.007
- [8] Kukielka J., Bańkowski W.: The experimental study of mineral-cement-emulsion mixtures with rubber powder addition. *Construction and Building Materials*, **226**, 30, 2019, 759-766, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.276
- [9] Raschia S., Graziani A., Carter A., Perraton D.: Laboratory mechanical characterisation of cold recycled mixtures produced with different RAP sources. *Road Materials and Pavement Design*, **20**, Sup. 1, 2019, S233-S246, DOI: 10.1080/14680629.2019.1588775
- [10] Miljković M., Poulidakos L., Piemontese F., Shakoorioskooie M., Lura P.: Mechanical behaviour of bitumen emulsion-cement composites across the structural transition of the co-binder system. *Construction and Building Materials*, **215**, 2019, 217-232, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.169
- [11] Konieczna K., Pokorski P., Sorociak W., Radziszewski P., Żymelka D., Król J.B.: Study of the stiffness of the bitumen emulsion based cold recycling mixes for road base courses. *Materials*, **13**, 23, 2020, ID article: 5473, DOI: 10.3390/ma13235473
- [12] Sangiorgi C., Tataranni P., Simone A., Vignali V., Lantieri C., Dondi G.: A laboratory and field evaluation of cold recycled mixture for base layer entirely made with reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials* **138**, 2017, 232-239, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.004
- [13] Tebaldi G., Dave E., Hugener M., Falchetto A.C., Perraton D., Grilli A., Lo Presti D., Pasetto M., Loizos A., Jenkins K., Apeageyi A., Grenfell J., Bocci M.: Cold recycling of reclaimed asphalt pavements. Testing and characterization of sustainable innovative bituminous materials and systems RILEM. *State-of-the-Art Reports*, 2018, 239-296, DOI: 10.1007/978-3-319-71023-5\_6
- [14] Yang W., Ouyang J., Meng Y., Han B., Sha Y.: Effect of curing and compaction on volumetric and mechanical properties of cold-recycled mixture with asphalt emulsion under different cement contents. *Construction and Building Materials*, **297**, 2021, ID article: 123699, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123699
- [15] Dołżycki B.: Instrukcja projektowania i w budowania mieszank mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). *Politechnika Gdańska*, 2019
- [16] Judycki J., Jaskuła P., Pszczoła M., Alenowicz J., Dołżycki B., Jaczewski M., Ryś D., Stiens M.: Katalog Typowych Konstrukcji Podatnych i Półsztywnych. *Politechnika Gdańska*, 2012

- [17] EN 12697-44:2019 Bituminous mixtures – Test methods – Part 44: Crack propagation by semi-circular bending test
- [18] *Szydłowski C., Dołżycki B.*: Ocena odporności na pękanie podbudów drogowych z mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). *Materiały Budowlane*, 1, 2017, 81-85, DOI: 10.15199/33.2017.10.28
- [19] EN 12697-31:2007 Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Specimen preparation by gyratory compactor
- [20] *Lemaitre J.*: A course on damage mechanics, Edition 2, Springer, 1996
- [21] *Neimitz A.*: Mechanika pęknięcia. PWN, 1998
- [22] *Lim I.L., Johnston I.W., Choi S.K.*: Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending. *Engineering Fracture Mechanics*, **44**, 3, 1993, 363-382, DOI: 10.1016/0013-7944(93)90030-V
- [23] Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice. NCHRP Report 614, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Transportation Research Board; National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C., 2008, DOI: 10.17226/14158
- [24] *Di Benedetto H., de La Roche C., Baaj H., Pronk A., Lundström R.*: Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM group contribution. 6th International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Zurich, 2003, DOI: 10.1617/2912143772.002