

PRZEMYSŁAW BUCZYŃSKI  
Kielce University of Technology  
e-mail: p.buczynski@tu.kielce.pl

# FATIGUE LIFE COMPARISON OF RECYCLED COLD MIXES WITH DIFERENT TYPE OF BITUMEN BINDER

## Abstract

*Knowledge of the fatigue life is required to properly predict pavement structure reliability with respect to the number of loading cycles. The possibility of using foamed bitumen and bitumen emulsion as binders in the composition of road bases makes it necessary to identify the influence of the binder type on the service life of these layers through dynamic tests. Obtaining proper physical and mechanical parameters does not necessarily ensure the correct evaluation of the recycled base quality. Satisfaction of the quality-related requirements does not guarantee the provision of the required fatigue life parameters. Cold recycled bases with cement should work within the viscoelastic range due to hydraulic bonding in the structure. If this range is exceeded, a considerable rise in strains occurs as a result of brittle fracture, leading to the loss of fatigue life.*

*The paper presents the results from the fatigue tests of recycled bases. The amount of bitumen used in both cases was 3% and 5%. For the production of the bitumen emulsion and foamed bitumen, 70/100 pen bitumen was used. Portland cement I 32,5R was applied as a binder. The binder comprised 3% of the mineral composition of the recycled base layer. Fatigue tests were performed in compliance with the requirements of enclosure E of PN-EN 12697-24 at a constant normal stress of 250 kPa, 375 kPa and 500 kPa. The results were used to compare the effects of the binder type applied to the recycled base and determine the service life in terms of the stress applied.*

**Keywords:** recycled cold mix, fatigue life, bitumen emulsion, foamed bitumen, cement, hydrate lime

## 1. Introduction

Deep cold recycling technology is now a solution applied worldwide to the rehabilitation of distressed pavement layers [1-3]. Limiting values for cold recycled bases (RCM – Recycled Cold Mix) are established nationally [4-8]. Investigations into the influence of individual components and interaction between them on the quality and service life of RCM bases in terms of, for example, frost durability [9], effect of the binding agent type [10, 11], possibility of using recycled aggregates, bitumen types, etc., have been reported in numerous publications. The design in which RCM base quality assessment is based only on conventional parameters, i.e., elastic modulus, indirect tensile strength or resistance to the action of water, does not provide required information about the fatigue life of road pavement structure with the recycled base layer. Many researchers in the highway engineering area [12-14] evaluate the quality of the recycled layers using fatigue life testing under cyclic

loads (controlled stress or strain). Dynamic loads are more destructive in cement-based structural layers than in fully flexible layers. Exceeding the limiting values of indirect tensile strength leads to cracking due to inadequate support of the layer relative to the load applied or, in extreme cases, to the overload. Cyclic loads reduce structural capacity of the pavement, which results from the drop in elastic modulus and increase in strain [15, 16]. The location of the recycled base layer [17] within the structural system is also important, as is the design number of axles 100 kN per design lane. Preliminary analyses [18] show that obtaining the required physical and mechanical parameters of the emulsion-based RCM base during the designing phase does not ensure providing the pavement structure with the required fatigue life. Stress values from the computational model transferred to the laboratory simulation showed that the fatigue life criterion laid down in enclosure E of PN-EN 12697-24 was not met. With the above in

mind, determining the fatigue life of a given recycled base layer with respect to type of the binder may facilitate decision-making process concerning the selection of binders for RCM bases.

## 2. Research plan

### 2.1. Object of study

To study the influence of the bitumen binder on the service life of the RCM base, the designed mineral-cement mix had to meet the requirements for limit curves of base layers with foamed bitumen [7] and with bitumen emulsion [8] intended for the road under 0.50 – 2.5 million axles 100 kN [19]. The combination of components allowed a simulation of the use of waste material derived from a road pavement. To evaluate the fatigue life of the recycled base layer, samples were obtained and tested in a laboratory using the indirect tensile test (ITT) in compliance with PN-EN 12697-24 Appendix E. To assess the impact of loading on the recycled base layer, the test was performed at constant stress levels. The normal stress levels used in the tests were selected based on the literature data [18, 19] and preliminary calculations of computational models for typical layer systems in the road pavement structure laid on elastic subgrade. Three levels were selected to vary the load effect: 250 kPa, 375 kPa and 500 kPa. The end of the test was tantamount to the failure of the specimen or to the completion of 30 000 strain cycles at the constant stress value. These assumptions comply with the regulations as given in enclosure E to the PN-EN 12697-24 reference standard.

### 2.2. Mix design

The mineral-cement mix design was prepared based on the technical guidelines and limit curves specified therein for the mix with foamed bitumen [7] and with bitumen emulsion [8].

The following components were used to produce the mineral-cement mix intended for the recycled base layer with foamed bitumen (FB-RCM) and bitumen emulsion [20] (BE-RCM): recycled asphalt pavement (RAP), crushed-stone aggregate from the existing base layer and continuously graded aggregate 0/4 mm. The design of the grading curve had to meet the criterion of good grading both for FB-RCM [7] and for BE-RCM [8, 21]. To provide the required aggregate grain size relative to the size of the Marshall mould, aggregates of sizes greater than 31.5 mm were separated. Figure 1 shows the designed grading curve.

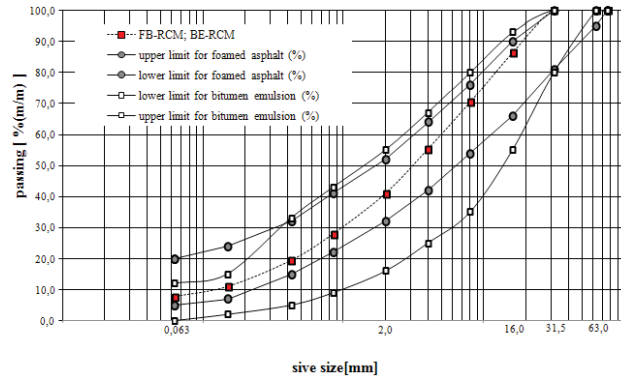


Fig. 1. Design grading curve of the recycled base layer

The same bitumen grade, 70/100, was used to produce foamed bitumen and emulsion. The bitumen binder in the cold base mix comprised 3% (m/m) and 5% (m/m). Type of the bitumen emulsion [20, 22] (C60B10ZM/R) was chosen according to the requirements laid down in PN-EN 13808:2013-10.

The design amount and the applied amount of the foamed bitumen were equal, whereas the amount of the bitumen emulsion had to be adjusted by adding water in order to obtain the same amounts of bitumen in the base mix composition. Thus the emulsion contents in the recycled base amounted to 5.0% (m/m) and 8.3% (m/m). Portland cement class 32.5 with high early strength, without additional constituents (CEM I 32,5R), was used as a binder at 3% (m/m).

Foaming characteristics of the bitumen were determined based on changes in water injection rate from 1.0% to 4.5% added at 0.5% increments, as well as on the expansion ratio ER<sub>m</sub> (maximum Expansion Ratio) and half life of the bitumen H-1 (Half life) [7]. The test results indicated that the optimum content of water needed to foam the bitumen in question was 3.0% at ER<sub>m</sub> = 8.0 and H-1 = 6.0 s.

The next stage of the recycled base mix design included determination of the optimum water content needed to obtain the maximum density of the mineral skeleton using the Proctor method defined by PN-EN 13286-2. The amount of water for the optimum moisture content was found to be 5.5% (m/m).

### 3. Durability assessment of the recycled base layer

The fatigue test of the RCM with respect to the bitumen binder was performed in compliance with enclosure E of PN-EN 12697-24 (Fatigue life test, IT-FT - Indirect Tensile-Fatigue Test). The specimens were subjected to compressive semi-sinusoidal repeated loading. A vertical diameter plane applied the load until the failure of the specimen.

To determine changes in the RCM, the fatigue test was performed at controlled stress. Normal stress values in the centre of the specimen were 250 kPa, 375 kPa and 500 kPa. Owing to varied specimen sizes and stress values, it was necessary to calculate the force, which induces stresses of equal value. The stress was calculated according to equation (1) with conversion to the value of the force sought.

$$\sigma_o = \frac{2P}{\pi \cdot t \cdot D} \quad (1)$$

where:  $\bar{\sigma}_o$  – tensile stress;  $P$  – maximum load,  $t$  – thickness of sample,  $D$  – diameter of sample.

Fatigue evaluation was represented as a change in strain level in the recycled base with respect to the binder used (foamed bitumen and bitumen emulsion). Prior to the test, the specimens were conditioned for 4 hours at 20°C.

The classical approach was used for fatigue life estimation of the RCM in terms of the binder amount and type [23, 24]. In the conventional method the fatigue failure is determined either when the strain reaches the double of initial value or when the elastic modulus drops to 50% of initial value [23, 25].

## 4. Results

### 4.1. Fatigue curves

Figure 2 shows fatigue characteristics. The fatigue plots are presented as a relationship between the number of loading cycles (log) and strain increase.

Different fatigue progress was observed at the stress of 375 kPa for the RCM with emulsion, and identical at 250 kPa for the base with foamed bitumen. The stress of  $\bar{\sigma}_o = 375$  kPa applied to the RCM with bitumen emulsion (3% and 5%) showed an increase in strain and the specimen failure before required 30 000 stress/strain cycles were completed. At failure, the specimens made with bitumen emulsion showed a strain of 830  $\mu\text{m}$ . Fatigue resistance loss in the RCM with bitumen emulsion occurred after 12 401 cycles for 3% emulsion content and after 3021 cycles for 5% emulsion content. Also, the recycled base layer with foamed bitumen at 375 kPa did not show any changes in fatigue life within 30 000 cycles. An increase in initial strain of 20  $\mu\text{m}$  was observed for FB-RCM at the stress increase of 125 kPa relative to 250 kPa. Analysis of fatigue curves of recycled bases made with foamed bitumen and bitumen emulsion at 500 kPa indicated a decline in fatigue resistance before the completion of 30 000 loading cycles. Similarly to the results obtained at 250 kPa and 375 kPa, the RCM

with bitumen emulsion at 500 kPa had the higher initial value and lower fatigue life with respect to the number of stress/strain loading cycles that the RCM base made with foamed bitumen.

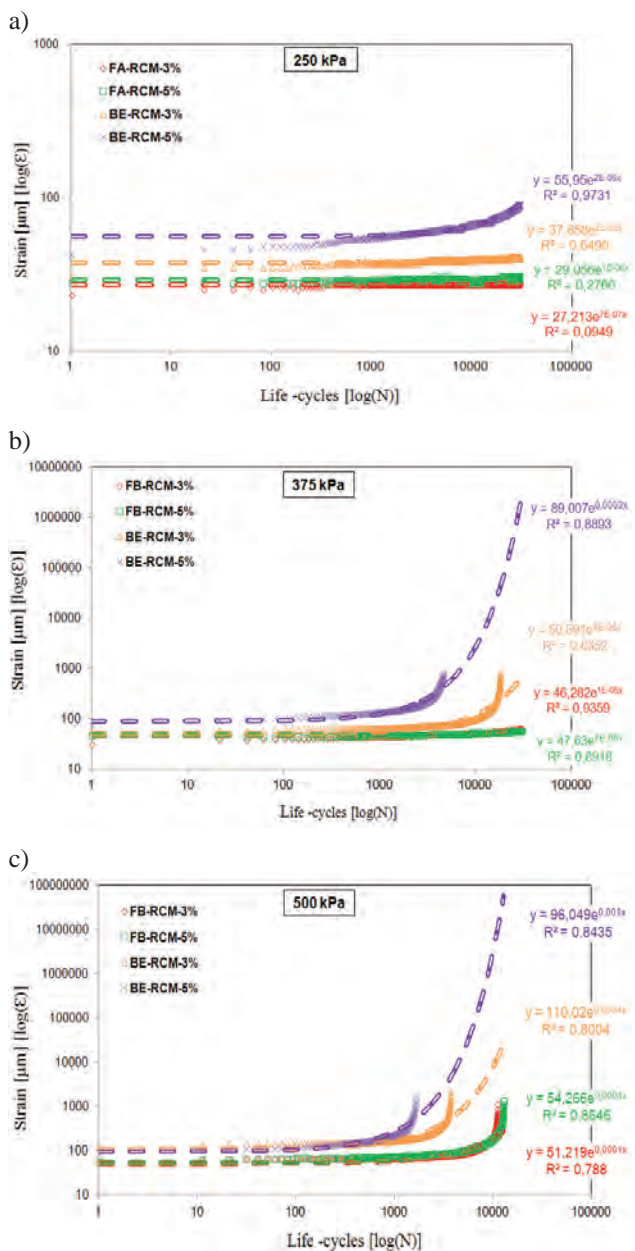


Fig. 2. Fatigue curves of the recycled base layer with respect to the binder type and normal stress: a) 250 kPa; b) 375 kPa; c) 500 kPa

### 4.2. Fatigue life evaluation

Fatigue life estimation was performed with respect to assumptions of the conventional method, which determines fatigue failure after reaching the double of initial strain. Regression curves describe the fatigue failure at the set level of stress, and the results are summarised in Figure 3.



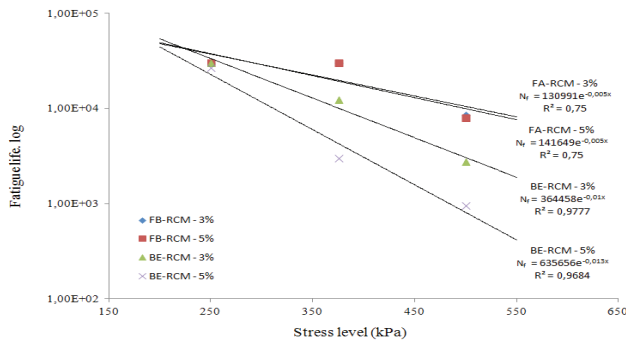


Fig. 3. Regression curve of fatigue life according to conventional method ( $\log N_f - \text{stress } \sigma$ )

Normal stress equal to 250 kPa does not cause any changes in the recycled base structure, irrespective of the type or amount of bitumen binder used. All bases are characterised by the maximum, test-determined number of stress/strain loading cycles ( $\sigma-\epsilon$ ). The fatigue correlation curves of the recycled bases with foamed bitumen, regardless of the bitumen content, lie close to one another. This confirms that the foamed bitumen content does not affect the fatigue life of the RCM base. The evaluation of the exponent of the function describing the fatigue life indicates that the RCM base with 3% content of bitumen emulsion shows two times faster decline in fatigue life compared with the RCM base made with 3% foamed bitumen. When 5% emulsion is used, the rate of fatigue life decline is three times faster. Therefore, it can be stated that recycled base layers with foamed bitumen will work over a wider viscoelastic range with respect to the stress levels that occur in the base layer.

## 5. Conclusion

Based on the analyses of fatigue life and fatigue characteristics of the recycled bases with foamed bitumen and bitumen emulsion, the following conclusions can be made:

- The type of the bitumen binder used does not affect the void space content in the recycled base layer. Recycled base layers with foamed bitumen and bitumen emulsion have the same void space contents, which allows a comparison of the results from the tests of their physical and mechanical properties as well as fatigue resistance.
- The recycled cold base with foamed bitumen shows the higher indirect tensile strength at 25°C compared with the strength of the base with bitumen emulsion. This is probably due to the technology of lowering bitumen viscosity by bitumen dispersion in water and the need to add emulsifiers and stabilizers to the binder to stabilise the mix.

- Recycled base layers with foamed bitumen and bitumen emulsion at a low stress of 250 kPa show similar changes of fatigue curves and do not show fatigue failure associated with the double increase in the initial strain value.
- Higher resistance to fatigue in the mode of controlled stress is observed in the base layer made with foamed bitumen as a binder. Generation of high stresses equal to 500 kPa changes the fatigue life of the base layer with foamed bitumen and leads to exceeding acceptable strain levels.

## References

- [1] Tabaković A., McNally C., Fallon E.: *Specification development for cold in-situ recycling of asphalt*. Construction and Building Materials, 102 (2016), pp. 318-328.
- [2] Stimilli A., Ferrotti G., Graziani A., Canestrari F.: *Performance evaluation of a cold-recycled mixture containing high percentage of reclaimed asphalt*, Road Materials and Pavement Design. 14 (2013), pp. 149-161.
- [3] Hashemian L., Kavussi A., Aboalmaali H.H.: *Application of foam bitumen in cold recycling and hydrated lime in airport pavement strengthening*, Case Studies in Construction Materials. 1 (2014), pp. 164-171.
- [4] Engineering manual, *Design and construction guidelines for full depth reclamation of asphalt pavement*, State of New York Department OF Transportation Geotechnical Engineering Bureau. August 2015.
- [5] Asphalt Academy, TG-2: *Bitumen Stabilized Materials, A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilized Materials*, Asphalt Academy, Pretoria, South Africa, May 2009.
- [6] Batista F., Valentin J., Čížková Z.: *Recycling: Road construction in a post-fossil fuel society CoRePaSol Characterization of Advanced Cold-Recycled Bitumen Stabilized Pavement Solutions Report on available test and mix design procedures for cold-recycled bitumen stabilised materials*, CEDR Call 2012.
- [7] Wirtgen GmbH, *Cold Recycling Technology*. Manual, 2nd edition, Germany 2012.
- [8] Dołżycki B.: *Instrukcja projektowania i wbudowywania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych*, GDDKiA, Gdańsk 2014 (in Polish).
- [9] Iwański M., Chomicz-Kowalska A.: *The effects of using foamed bitumen and bitumen emulsion in the cold recycling technology*, 8th Inter. Conference. Environmental Engineering, Vilnius, Lithuania. (2011) pp. 1089-1096.
- [10] Buczyński P., Lech M.: *The Impact of One-, Two- and Three-component Hydraulic Road Binder on the Properties of the Hydraulically Bound Mixture*. Procedia Engineering 108, (2015), pp 116-123. doi:10.1016/j.proeng. 2015.06.126.

- [11] Mahamedi A., Khemissa M.: *Stabilization of an expansive over consolidated clay using hydraulic binders*, Housing and Building National Research Center HBRC Journal HBRC Journal 11 (2015), pp. 82-90.
- [12] Yan J., Ni F., Yang M., Li J.: *An experimental study on fatigue properties of emulsion and foam cold recycled mixes*, Construction and Building Materials 24 (2010), pp. 2151-2156.
- [13] Underwood B.S.: *A continuum damage model for asphalt cement and asphalt mastic fatigue*, International J. of Fatigue 82 (2016), pp. 387-401.
- [14] Leandri P., Losa M., Di Natale A.: *Field validation of recycled cold mixes viscoelastic properties*, Construction and Building Materials 75 (2015), pp. 275-282.
- [15] Ameri M., Nowbakht S., Molayem M., Mirabimoghaddam M.H.: *A study on fatigue modeling of hot mix asphalt mixtures based on the viscoelastic continuum damage properties of asphalt binder*, Construction and Building Materials 106 (2016), pp. 243-252.
- [16] Mannan U.A., Islam M.R., Tarefder R.A.: *Effects of recycled asphalt pavements on the fatigue life of asphalt under different strain levels and loading frequencies*, International Journal of Fatigue 78 (2015), pp. 72-80.
- [17] Iwański M., Chomicz-Kowalska A.: *Evaluation of the pavement performance*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, 63 (2015) 97-105. doi.org/10.1515/bpasts-2015-0011.
- [18] Iwański M., Buczyński P., Mazurek G.: *Characteristics of the fatigue life (IT-FT) of the recycled base course at the controlled stresses state*, Budownictwo i Architektura 13/4 (2014), pp. 109-116 (in Polish).
- [19] Judycki J.: *Analysis and design of flexible and semi-rigid pavement structures*, WKŁ. Warszawa 2014 (in Polish).
- [20] Szczepaniak Z.: *Vademekum kationowych emulsji asfaltowych*, IBDiM. Warszawa 2013 (in Polish).
- [21] IBDiM 1999 Warunki techniczne wykonywania warstw z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE), Zeszyt 61, IBDiM [Road and Bridge Research Institute], Warszawa, p. 44 (in Polish).
- [22] Becher P.: *Emulsion: Theory and Practice*, third ed., Oxford University Press, 2001.
- [23] Bańkowski W., *Analiza trwałości zmęczeniowej kompozytów mineralno-asfaltowych metodą konwencjonalną oraz metody energii rozproszonej*, IBDiM. Warszawa 2008 (in Polish).
- [24] Pronk A.C.: *Fatigue lives of asphalt beams in 2 and 4 point dynamic bendings testes based on a "new" fatigue life definition using the dissipated energy concept*. Controlled displacement mode. DWW, 1997.
- [25] Rowe G.M., Boulding M.G.: *Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphalt mixture*. Eurobitume, 2000.

Przemysław Buczyński

# Porównanie trwałości zmęczeniowej recyklowanej mieszanki na zimno z różnym rodzajem lepiszcza asfaltowego

## 1. Wprowadzenie

Technologia recyklingu głębokiego na zimno stosowana jest na szeroką skalę w świecie do przebudowy zniszczonych warstw konstrukcji nawierzchni drogowych [1-3]. Dynamiczne obciążenia występujące w warstwach konstrukcyjnych, zawierających w swoim składzie cement, są bardziej destrukcyjne niż dla warstw w pełni podatnych. Przekroczenie granicznej wartości wytrzymałości na rozciąganie pośrednie wpływa na powstawanie spękań związanych z niewystarczającą nośnością warstwy w stosunku do obciążenia lub w skrajnych przypadkach przeciążenia w dopuszczalnych obciążeniach. Cykliczne obciąże-

nia powodują zmniejszenie nośności, wynikające ze spadku modułu sztywności oraz przyrostu odkształcenia, obciążanych warstw konstrukcyjnych [15, 16]. Dlatego też określenie trwałości zmęczeniowej recyklowanej podbudowy, w aspekcie rodzaju lepiszcza, umożliwi prawidłowe podejmowanie decyzji przy wyborze lepiszcza do warstw recyklowanych przeznaczonych na podbudowy drogowe.

## 2. Plan badań

### 2.1. Obiekt badań

Do oceny wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego na trwałość recyklowanej podbudowy (RCM) zaprojekt-

towano mieszankę mineralno-cementową spełniającą wymagania krzywych granicznych dla podbudowy z asfaltem spienionym [7] oraz emulsją asfaltową [8] przeznaczoną na drogę obciążoną 0,50-2,5 mln osi 100 kN [19]. W celu oceny trwałości zmęczeniowej recyklowanej podbudowy przygotowano próbki w laboratorium i poddano obciążeniu dynamicznemu w teście pośredniego rozciągania (ITT), zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 12697-24, załącznik E. Wybrano trzy wartości naprężeń, umożliwiające zróżnicowanie oddziaływania obciążenia, tj. 250 kPa, 375 kPa oraz 500 kPa.

## 2.2. Projekt mieszanki mineralnej

W mieszance mineralno-cementowej przeznaczonej do wykonania recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym (FA-RCM) [7] oraz emulsją asfaltową (BE-RCM) [8, 20] zastosowano następujące składniki: destrukta asfaltowy (RAP), kruszywo łamane z istniejącej podbudowy oraz kruszywo o ciągłym uziarnieniu 0/4 mm. Do wytworzenia emulsji asfaltowej i piany asfaltowej wykorzystano ten sam rodzaj asfaltu o penetracji 70/100. Lepiszczka asfaltowa wykorzystana do przygotowania recyklowanej podbudowy na zimno stanowiło odpowiednio 3% (m/m) oraz 5% (m/m). Rodzaj emulsji asfaltowej [20, 22] (C60B10ZM/R) wynikał z wymagań normy zharmonizowanej PN-EN 13808:2013-10.

## 3. Ocena trwałości recyklowanej podbudowy

Badanie zmęczenia recyklowanej podbudowy, w aspekcie rodzaju lepiszcza asfaltowego, przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12697-24, załącznik E. Próbkę wykorzystaną do oceny poddano cyklicznemu obciążeniu ściskającemu z sygnałem pół-sinusoidalnym. Obciążenie zostało przykładane do próbki poprzez średnicową płaszczyznę pionową, co w efekcie powoduje zniszczenie próbki poprzez rozłupanie wzdłuż pionowej średnicy. W celu określenia zmian w recyklowanej podbudowie ocenę trwałości przeprowadzono przy kontrolowanym naprężeniu. Wartości naprężenia normalnego zastosowana do oceny jakości recyklowanej podbudowy w środku próbki była równa 200 kPa, 375 kPa oraz 500 kPa.

## 4. Wyniki badań

### 4.1. Krzywe zmęczeniowe

Badanie zmęczenia przy naprężeniu równym 250 kPa nie wykazało znaczącej zmiany przyrostu odkształceń ( $\epsilon$ ), która mogłaby świadczyć o zniszczeniu struktury próbki. Należy jedynie zaznaczyć, że

recyklowane podbudowy z asfaltem spienionym charakteryzują się niższym poziomem odkształcenia początkowego w porównaniu do podbudowy z emulsją asfaltową. Odmienne przebiegi zmęczenia recyklowanej podbudowy stwierdzono dla naprężenia równego 375 kPa – w przypadku recyklowanej podbudowy z emulsją asfaltową, a jednakowy jak dla naprężenia 200 kPa – dla podbudowy z asfaltem spienionym. Przyłożone naprężenie  $\sigma_0 = 375$  kPa do recyklowanej podbudowy na zimno z emulsją asfaltową (3% oraz 5%) wykazuje przyrost odkształcenia oraz zniszczenie próbki przed wymaganą ilością 30 000 cykli naprężenie-odkształcenie. Przy zniszczeniu próbki recyklowanej podbudowy z emulsją asfaltową charakteryzowały się odkształceniem na poziomie 830  $\mu\text{m}$ . Utrata trwałości recyklowanej podbudowy z emulsją asfaltową wystąpiła po przekroczeniu odpowiednio 12 401 cykli dla 3% ilości emulsji oraz 3021 dla 5% ilości emulsji w składzie podbudowy. Należy również zaznaczyć, że recyklowana podbudowa z asfaltem spienionym dla naprężenia 375 kPa nie wykazuje zmian trwałości w zakresie ilości cykli określonych w badaniu 30 000. Jedynie zaobserwowano wzrost początkowego odkształcenia dla FB-RCM na poziomie 20  $\mu\text{m}$  przy wzroście naprężenia o 125 kPa w stosunku do wartości 250 kPa. Dokonując analizy charakterystyk krzywych zmęczeniowych recyklowanych podbudów z asfaltem spienionym oraz emulsją asfaltową przy naprężeniu równym 500 kPa należy stwierdzić, że recyklowane podbudowy wykazały spadek trwałości przed wymaganą ilością 30 000 cykli. Tak jak w przypadku analizy trwałości przy naprężeniu równym 250 kPa oraz 375 kPa recyklowana podbudowa z emulsją asfaltową dla naprężenia równego 500 kPa charakteryzuje się znacznie wyższą wartością odkształcenia początkowego oraz niższą trwałością w odniesieniu do ilości cykli obciążeniowych naprężenie-odkształcenie niż podbudowa z asfaltem spienionym.

### 4.2. Ocena trwałości zmęczeniowej

Przyłożone naprężenie normalne równe 250 kPa, niezależnie od rodzaju oraz ilości lepiszcza asfaltowego, nie wywołuje zmian w strukturze recyklowanych podbudów. Wszystkie charakteryzują się maksymalną, określoną w badaniu, ilością cykli obciążeniowych naprężenie-odkształcenie ( $\sigma-\epsilon$ ). Należy zauważyć, że krzywe korelacji trwałości w przypadku recyklowanych podbudów zawierających w swoim składzie asfalt spieniony, niezależnie od ilości asfaltu, są ułożone blisko siebie. Świadczy to o braku wpły-

wu ilości asfaltu spienionego na trwałość recyklowanej podbudowy. Dokonując oceny wykładnika funkcji opisującej trwałość zmęczeniową, można stwierdzić że, recyklowana podbudowa z emulsją asfaltową w ilości 3%, w odniesieniu do podbudowy z asfaltem spienionym w ilości 3%, charakteryzuje się dwukrotnie szybszym spadkiem trwałości. Zastosowanie emulsji w ilości 5% powoduje ponad trzykrotnie szybsze tempo spadku trwałości. Dlatego też możliwe jest stwierdzenie, że recyklowane podbudowy z asfaltem spienionym będą pracowały w szerszym zakresie lepko-sprężystym w odniesieniu do poziomu naprężeń występujących w podbudowie.

## 5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz trwałości zmęczeniowej oraz charakterystyk zmęczenia recyklowanych podbudów z asfaltem spienionym oraz emulsją asfaltową, możliwe jest sformułowanie następujących wniosków:

- Rodzaj zastosowanego lepiszcza asfaltowego nie powoduje różnicowania ilości wolnych przestrzeni w recyklowanej podbudowie. Recyklowana podbudowa z asfaltem spienionym oraz emulsją asfaltową charakteryzuje się taką samą zawartością wolnej przestrzeni, co umożliwia na

dokonywanie porównań uzyskanych wyników badań właściwości fizycznych, mechanicznych oraz odporności na zmęczenie.

- Recyklowana podbudowa z asfaltem spienionym charakteryzuje się wyższą wytrzymałością na pośrednie rozciąganie w temperaturze 25°C w porównaniu z wytrzymałością podbudowy z emulsją asfaltową. Związane jest to prawdopodobnie z technologią obniżenia lepkości asfaltu poprzez dyspersję asfaltu w wodzie oraz koniecznością wprowadzenia do składu lepiszcza emulgatorów i stabilizatorów umożliwiających wytworzenie stabilnej mieszaniny.
- Recyklowane podbudowy z asfaltem spienionym oraz emulsją asfaltową przy niskim poziomie naprężenia równym 250 kPa charakteryzują się podobną zmianą krzywych zmęczeniowych. Nie wykazują utraty trwałości związanej z dwukrotnym wzrostem początkowego odkształcenia.
- Wyższą odpornością na zmęczenie w trybie kontrolowanego naprężenia charakteryzuje się podbudowa, w której składzie zastosowano jako lepiszcze asfalt spieniony. Wygenerowanie wysokich naprężeń równych 500 kPa wywołuje zmiany w trwałości podbudowy z asfaltem spienionym i przekroczenie dopuszczalnych odkształceń.