

Przemysław BUCZYŃSKI<sup>1</sup>

## CHARAKTERYSTYKA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ RECYKLOWANEJ PODBUDOWY

W artykule przedstawiono ocenę trwałości zmęczeniowej recyklowanej podbudowy wykonanej w technologii recyklingu głębokiego na zimno z emulsją asfaltową (MCE). W składzie recyklowanej podbudowy zastosowano trzy spoiwa tj. cement CEM I 32,5R, wapno hydratyzowane  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz mieszaninę cementu i wapna hydratyzowanego w proporcjach 50% CEM do 50%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Udział spoiwa w mieszance recyklowanej podbudowy ustalono na 2,5%. Jako lepiszcze zastosowano kationową emulsję wolnorozpadową C60B10 ZM/R w ilości 3%. W celu określenia jakości recyklowanej podbudowy wykonano podstawowe badanie właściwości fizycznych oraz mechanicznych tj. zawartość wolnej przestrzeni  $V_m$ , wytrzymałość na pośrednie rozciąganie  $\text{ITS}_{\text{DRY}}$ , odporność na działanie wody TSR oraz moduł sztywności w pośrednim rozciąganiu  $S_m$  w temperaturze 2°C, 10°C oraz 20°C. Ocenę trwałości zmęczeniowej recyklowanej podbudowy określono w teście pośredniego rozciągania (Indirect Tensile – Fatigue Test) zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12697-26 zał. E. Badanie przeprowadzono w trybie kontrolowanego naprężenia tj. 250 kPa, 400 kPa oraz 500kPa. Badanie zmęczenia recyklowanej podbudowy pozwoliło określić wpływ rodzaju spoiwa na zmianę trwałości przy cyklicznym obciążeniu oraz zmiennym poziomie naprężenia. W oparciu o założenia planu badań możliwe było wytypowanie, spoiwa które zapewni użytkownikowi wymaganą trwałość zmęczeniową.

**Słowa kluczowe:** recyklowana podbudowa, emulsja asfaltowa, mieszanka mineralno cementowo-emulsyjna, trwałość zmęczeniowa, spoiwo drogowe

### 1. Wstęp

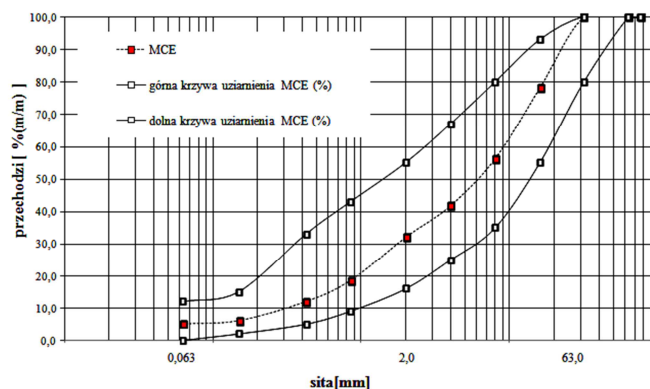
Projektowanie konstrukcji nawierzchni drogowych [9, 11, 13] wykorzystuje znajomość modułów sztywności warstw konstrukcyjnych oraz wartości współczynnika Poissona [9], które ulegają zmianie w zależności od temperatur oraz czasu obciążenia. Prawidłowe wykorzystanie parametrów [13] pozwala zaprojektować nośną konstrukcję nawierzchni drogową spełniającą założenia.

<sup>1</sup> Przemysław Buczyński, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314, 509-470-553, p.buczynski@tu.kielce.pl

Przekroczenie granicznych wartości powoduje utratę trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni drogowej i rozpoczęcie się procesu destrukcji np. pęknięcie warstw asfaltowych spowodowane przekroczeniem granicznych odkształceń poziomych na spodzie warstw asfaltowych [9, 14]. Zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych jest jednym z najważniejszych kryteriów projektowania konstrukcji nawierzchni drogowej. Pęknięcie zmęczeniowe jest jedną z głównych przyczyn obniżonej trwałości. Oddziaływanie sił wywołanych od poruszających się pojazdów generuje różny poziom naprężeń wewnątrz warstw konstrukcyjnych. Przekroczenie trwałości warstw konstrukcyjnych inicjuje powstanie pęknięcia, a dalszy ruch pojazdów powoduje pogłębianie się tego zjawiska [4]. Zależność pomiędzy sztywnością i trwałością zmęczeniową jest związana z poziomem odkształcenia warstw konstrukcyjnych nawierzchni drogowej [3]. Dostępność metod badawczych określonych w PN-EN 12697-26 umożliwiła badaczom ocenę trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralnych zawierających w swoim składzie lepiszcze asfaltowe [2, 10]. Rozpoznanie poziomu naprężeń niszczących występujących w recyklowanej podbudowie pozwoli na prawidłowe modelowanie konstrukcji nawierzchni drogowej.

## 2. Przedmiot badań

Projekt recyklowanej mieszanki przeznaczonej na warstwę podbudowy zakładał uzyskanie ciągłości uziarnienia [8] zgodnie z wymaganiami wytycznych [6, 15]. Przebieg projektowanej krzywej przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Projektowana krzywa uziarnienia recyklowanej podbudowy MCE

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

W składzie recyklowanej podbudowy zastosowano: kruszywo naturalne 0/2, kruszywo o ciągłym uziarnieniu 0/32 oraz destrukta asfaltowy (RAP). Spoiwo w składzie podbudowy stanowiło 2,5%. W celu określenia zróżnicowania

wpływu spoiwa [7] zastosowano jego trzy rodzaje: pierwsze jako 100% cement portlandzki CEM I 32,5R, drugie 50% wapno hydratyzowane  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz 50% cement portlandzki CEM I 32,5R oraz trzecie spoiwo w postaci 100% wapna hydratyzowanego  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Jako lepiszcze asfaltowe zastosowano kationową emulsję asfaltową wolnorozpadową C60B10 R/ZM zgodną z wymaganiami normy PN-EN 13808:2013-10.

### 3. Program i wyniki badań

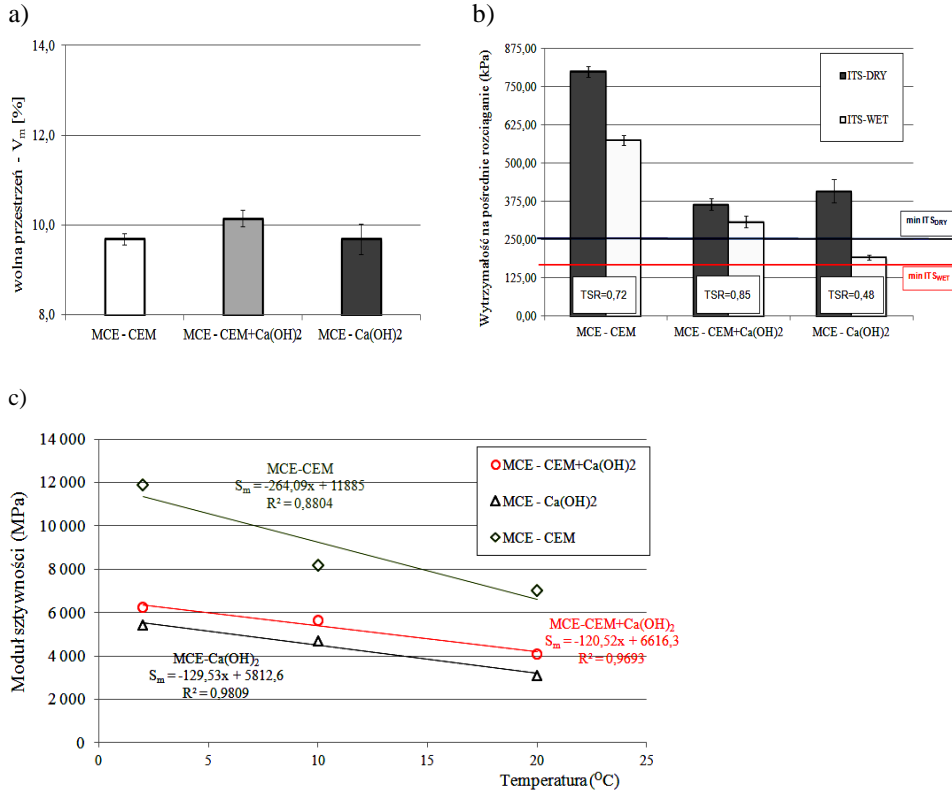
Program badań recyklowanej podbudowy obejmował dwa etapy. W etapie I określono podstawowe parametry recyklowanej podbudowy w odniesieniu do wymagań [6, 15] tj.: zawartość wolnej przestrzeni  $V_m$ , wytrzymałość na pośrednie rozciąganie  $\text{ITS}_{\text{DRY}}$  oraz  $\text{ITS}_{\text{WET}}$ , odporność na działanie wody TSR oraz moduł sztywności w pośrednim rozciąganiu zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12697-26 zał. C (IT-CY) dla temperatur  $2^\circ\text{C}$ ,  $10^\circ\text{C}$  oraz  $20^\circ\text{C}$ , które ustalono w odniesieniu do pracy podbudowy w różnych porach roku [9]. Wartość średnią określono dla sześciu prób zagęszczonych w laboratorium. W drugim etapie badań przeprowadzono ocenę zmęczenia podbudowy dla trzech poziomów naprężenia 250 kPa, 400 kPa oraz 500 kPa. W badaniu zmęczenia próbki Marshalla poddawano półsinusoidalnemu obciążeniu o czasie obciążenia 10Hz [12]. Ocenę trwałości przeprowadzono na trzech próbkach dla każdego poziomu naprężenia. Za utratę trwałości przyjęto moment kiedy odkształcenie określone po 100 cyklu zwiększa się dwukrotnie.

#### 3.1. Wyniki badań właściwości fizycznych i mechanicznych

Wyniki badań podstawowych właściwości fizycznych i mechanicznych z etapu pierwszego przedstawiono na rysunku 2.

Brak istotnej zmienności parametru wolnej przestrzeni ( $V_m$ ) pozwala na porównywanie uzyskanych parametrów recyklowanej podbudowy z wykluczeniem wpływu zmiennej nośności.

Ocena parametrów mechanicznych recyklowanej podbudowy wykazuje znaczący wpływ cementu na ich zmienność. Recyklowana podbudowa zawierająca w swoim składzie spoiwo w postaci cementu portlandzkiego (MCE-CEM) charakteryzuje się największą wytrzymałością na pośrednie rozciąganie  $\text{ITS}_{\text{DRY}}$ ,  $\text{ITS}_{\text{WET}}$  oraz niezależnie od temperatury badania największym modułem sztywności w pośrednim rozciąganiu ( $S_m$ ). Stwierdzono pozytywny wpływ wapna hydratyzowanego na działanie wody TSR. Dodatek  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  w składzie spoiwa umożliwił na uzyskanie podbudowy o większej trwałości w aspekcie oddziaływania czynników atmosferycznych w porównaniu do podbudowy ze spoiwem cementowym. Zaobserwowano wzrost wskaźnika TSR o 18%.

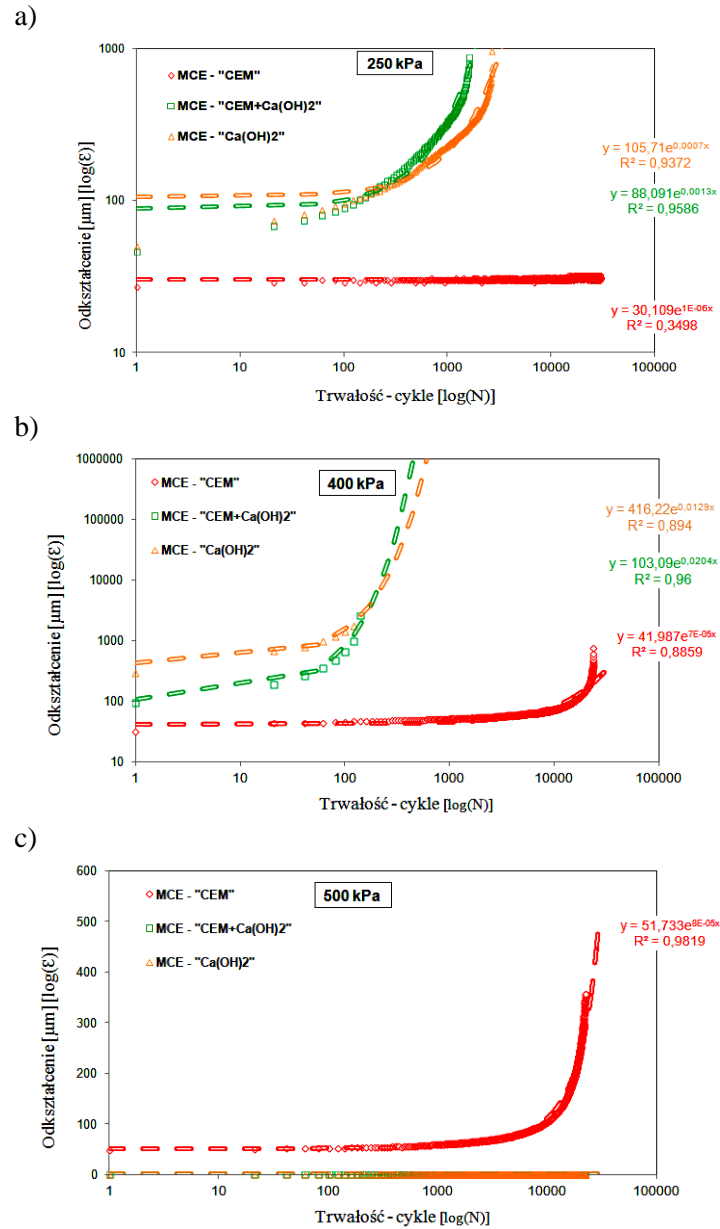


Rys. 2. Właściwości fizyczne i mechaniczne recyklowanej podbudowy MCE

Fig. 2. The physical and mechanical properties of a cold recycled MCE MCE

### 3.2. Wyniki badań zmęczenia ITT (Indirect Tensile Test)

Badanie zmęczenia wykonano zgodnie z PN-EN 12697-24 zał. E. Analiza literatury [2, 5] wykazuje możliwość wydzielenia trzech faz w cyklu badawczym. W fazie I następuje znaczny przyrost odkształcenia [1]. W fazie II przyrost odkształcenia następuje stopniowo, występuje liniowy trend zmęczenia. W fazie III następuje gwałtowna degradacja próbki i znaczny przyrost odkształcenia związany z propagacją pęknięcia, aż do zniszczenia materiału. W badaniu zastosowano kontrolowane naprężenie 250kPa, 400kPa oraz 500kPa. Czas obciążenia odpowiadał częstotliwości 10Hz. Wyniki badań zmęczenia w aspekcie kontrolowanego naprężenia oraz rodzaju zastosowanego spoiwa przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Charakterystyki zmęczeniowe recyklowanej podbudowy przy kontrolowanym naprężeniu: a) 250kPa, b) 400kPa, c) 500kPa

Fig. 3. Characteristic the fatigue of the recycled base layer with respect to the binder type and normal stress: a) 250kPa; b) 400kPa; c) 500kPa

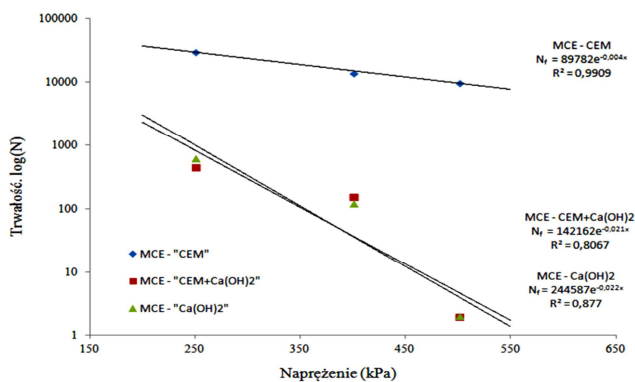
Dokonując analizy charakterystyki zmęczenia można stwierdzić, że wzrost poziomu naprężenia generuje wzrost odkształceń w różnym stopniu. Analizując trwałości recyklowanych podbudów przy naprężeniu 250kPa można stwierdzić, że najniższy poziom odkształcenia początkowego po 100-tnym równy 30  $\mu\text{m}$  uzyskała, podbudowa (MCE-CEM). Najwyższą wartość odkształcenia równą 105  $\mu\text{m}$  uzyskała podbudowa MCE - CEM+Ca(OH)<sub>2</sub>. Podobne charakterystykami zmęczeniowe wykazują mieszanki MCE -CEM+Ca(OH)<sub>2</sub> oraz MCE-Ca(OH)<sub>2</sub>. Odkształcenie początkowe w przypadku podbudowy ze spoiwem mieszanymi było mniejsza o 17  $\mu\text{m}$ , natomiast ilość cykli obciążeniowych potrzebnych do zniszczenia była mniejsza o 1100 cykli. Należy również dodać, że przy zadanym naprężeniu 250kPa, jedynie mieszanka referencyjna MCE-CEM osiągnęła minimalną ilość cykli 30 tys. zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12697-26 zał. E.

Analizując charakterystyki zmęczeniowe dla naprężenia 400kPa pozwala stwierdzić, że przebieg jest podobny do określonych przy naprężeniu 250kPa. Jedynie wartości początkowych odkształceń i ilość cykli potrzebnych do zniszczenia próbki są nieznacznie większe.

Odmienne zachowanie recyklowanej podbudowy zaobserwowano dla naprężenia równego 500kPa. W przypadku mieszanek MCE-CEM+Ca(OH)<sub>2</sub> i MCE-Ca(OH)<sub>2</sub> nie możliwe było określenie początkowych wartości odkształceń ze względu na zniszczenie prób przed osiągnięciem 100-tnego obciążenia. Dodatkowo podbudowa z cementem (MCE-CEM) wykazała znaczący przyrost odkształcenia już po 10 tys. cykli.

### 3.3. Ocena trwałości zmęczeniowej

Ocenę trwałości zmęczeniowej (rys. 4) przeprowadzono zgodnie z założeniami metody konwencjonalnej [2].



Rys. 4. Krzywa regresji trwałości zmęczeniowej ( $\log N_f$  - stress  $\sigma$ )

Fig. 4. Regression curve of fatigue life ( $\log N_f$  - stress  $\sigma$ )

Analiza trwałości zmęczeniowej recyklowanej podbudowy wykazała, że podbudowa MCE - CEM charakteryzowała się niewielkim spadkiem trwałości w zakresie przyrostu naprężenia. Dodatek wapna hydratyzowanego w składzie spoiwa powodował spadek trwałości zmęczeniowej. Przy najwyższym poziomie naprężenia równym 500kPa dodatek wapna hydratyzowanego powodował całkowity brak trwałości zmęczeniowej.

#### 4. Wnioski

Na podstawie analizy wyników badań recyklowanej podbudowy z emulsją asfaltową można sformułować następujące wnioski:

1. Dodatek  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  w składzie spoiwa umożliwił na uzyskanie podbudowy o większej trwałości w aspekcie oddziaływania czynników atmosferycznych w porównaniu do podbudowy ze spoiwem cementowym.
2. Wzrost poziomu naprężeń generuje wzrost odkształceń w różnym stopniu zależnie od rodzaju spoiwa zastosowanego w składzie recyklowanej podbudowie MCE.
3. Przekroczenie naprężeń 400kPa w przypadku podbudów recyklowanych może być niszczące i powodować utratę trwałości zmęczeniowej.
4. Przy poziomie naprężeń równym 500kPa dodatek wapna hydratyzowanego w składzie spoiwa powodował całkowity spadek trwałości.

#### Literatura

- [1] Kavussi A., Modarres A.: Laboratory fatigue models for recycled MCEs with bitumen emulsion and cement, *Construction and Building Materials*, nr 24, 2010, s. 1920–1927.
- [2] Bańkowski W.: Analiza trwałości zmęczeniowej kompozytów mineralno-asfaltowych metodą konwencjonalną oraz metodą energii rozproszonej, IBDiM, Warszawa 2008.
- [3] Brown F.S., Needham D.: A study of cement modified bitumen emulsion mixtures, In: *Proceedings of association of asphalt paving technologists*, Reno, USA, 69/2000.
- [4] De Beer M.: Aspects of the design and behavior of road structures incorporating lightly cementitious layers. PhD thesis, University of Pretoria, 1990.
- [5] Di Benedetto H., Asheyer Soltani A., Chaverot P.: Fatigue damage for bituminous mixtures. The Fifth International Rilem Symposium MTBM Lyon 1997.
- [6] Dołżycki B.: Instrukcja projektowania i wbudowywania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). GDDKiA, Gdańsk 2014.
- [7] Iwański M., Buczyński P.: Properties of the Recycled Base Course with Respect to the Road Binder Type, 9th International Conference Environmental Engineering, Vilnius, Lithuania, 2014.
- [8] Iwański M., Chomicz-Kowalska A.: The effects of using foamed bitumen and bitumen emulsion in the cold recycling technology, 8th International Conference. Environmental Engineering, Vilnius, Lithuania, 2011, s. 1089-1096.

- [9] Judycki J.: Analiza i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych, WKŁ, Warszawa 2014.
- [10] Kukiełka J.: Trwałość podbudów z mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MMCE). Budownictwo i Architektura, nr 1, 2007, s. 45-56.
- [11] Piłat J., Radziszewski P.: Nawierzchnie asfaltowe, WKŁ, Warszawa 2010.
- [12] Stefańczyk B., Mieczkowski P.: Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2008.
- [13] Sybilski D.: Katalog Przebudów w i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych KPRNPP-2013. GDDKiA. Warszawa 2013.
- [14] Wasilewska M., Plewa A., Gardziejczyk W.: Wybrane problemy konstruowania nawierzchni drogowych, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2/2011, s. 183-189.
- [15] Wirtgen Group, Cold Recycling Technology. 1th edition, Wirtgen GmbH, Windhagen, Germany, 2012.

## THE CHARACTERISTIC FATIGUE LIFE OF RECYCLED COLD MIX MCE

### Summary

In the article has been presented an evaluation of the fatigue resistance of the base layer in the deep cold recycling technology with bitumen emulsion (MCE). Three-component binder has been used. It consisted of cement CEM I 32.5R, hydrated lime  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and their blend where ratio was 50% to 50%. The proportion of performed binder, added to the recycled mixture, was 2.5% by mass of the recycled mixture. As a binder was used slow-setting cationic bituminous emulsion C60B10 ZM/R in the amount of 3%. For the purpose of determining quality of recycled base layer the selected properties were considered: void content  $V_m$ , indirect tensile strength ITS<sub>DRY</sub>, water resistance TSR and stiffness modulus  $S_m$  according to IT-CY methodology at temperature 2°C, 10°C and 20°C. Additionally the evaluation of the fatigue resistance was performed according to IT-FT under PN-EN 12697-26 annex E. The test was conducted under the stress controlled mode at the level of 250 kPa, 400 kPa and 500kPa. The fatigue test of recycled base layer allowed to determine the influence of the binder kind on the durability under cyclic load. Basing on the experiment plan it was possible to find the optimal composition of the binder which guarantees a failure-free service life of the base under a specific cyclic load.

**Keywords:** recycled cold base, bitumen emulsion, bitumen emulsion recycled cold MCE, fatigue life, road binder

*Przesłano do redakcji: 07.06.2016 r.*

*Przyjęto do druku: 30.06.2016 r.*

DOI: 10.7862/rb.2016.70