

MAREK IWAŃSKI
ANNA CHOMICZ-KOWALSKA

Kielce University of Technology
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce, Poland
e-mail: iwanski@tu.kielce.pl
e-mail: akowalska@tu.kielce.pl

RESISTANCE OF THE PAVEMENT TO WATER AND FROST IN THE COLD RECYCLING TECHNOLOGY

Abstract

The road pavement structure (apart from having the required load capacity) should be water and frost resistant. This is important for pavements produced with the cold recycling technology. Foamed bitumen and, alternatively, bitumen emulsion were used for the resistance tests of the pavements. The bitumen binder content in the recycled material was 2.0%, 2.5% and 3.0%. The tests (stability against deformation, Marshall stiffness and indirect tensile strength (ITS)) showed that use of foamed bitumen is more advantageous than bitumen emulsion. That is in terms of mechanical properties of pavement. The measurements of resistance due to water and frost (according to AASHTO T283 method) and resistance to low temperature cracking (according to the PANK 4302 method) confirmed that pavement produced with the cold recycling technology is resistant to these climatic factors. The tests also showed that pavement produced with foamed bitumen is more resistant than pavement with bitumen emulsion. It is suggested, that general water resistance criterion (tensile strength retained (TRS)) of such pavement should be broadened to include e.g. the AASHTO T283 method.

The paper was presented at the International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control in Torino, Italy.

Keywords: pavement, base, foamed bitumen, cold recycling technology, PANK 4302, AASHTO T283

1. Introduction

The constantly deteriorating condition of asphalt roads in Poland is one of the crucial problems in road engineering. There are many reasons for accelerated degradation of pavements. Some of them are: the growing number of heavy trucks, an increase in vehicle axle loading from 100 kN to 115 kN, aging of pavement, improper design for the weather conditions, and improper maintenance.

The need to modernize the road network and the necessity to build highways led to increased demand for an aggregate. Its supply has been insufficient for years. It resulted in broad interest in alternative methods of road construction. These methods should improve the efficiency in road repairs. Technologies which reuse construction materials are of particular interest. That allows to better manage the funds allocated for road maintenance.

The use of the cold recycling technology is advantageous. For technical, economical and ecological reasons. Reusing materials taken from

old pavements is lowering the exploitation rate of mineral deposits. Thus, its reducing the impact on the environment.

The cold recycling technology is the method more and more commonly used. Especially for significantly damaged asphalt surfaces where ruts and fatigue crack are seen. In Poland the technology using mineral – cement – emulsion (M-C-E) mixes is popular. However, in recent years due to demand for modernization of the road network this approach is changing approach. The emphasis is placed on improvement of the load capacity of surface construction. The foamed bitumen is used instead of bitumen emulsion. This bitumen binder enables to obtain more durable road pavements [1].

Foamed bitumen contains very little water. Its curing period is shorter than bitumen emulsion. The pavement made with this technology can almost immediately be covered by other layers. Another advantage is the 100% use of an old material from destructed pavements. And to produce a new load

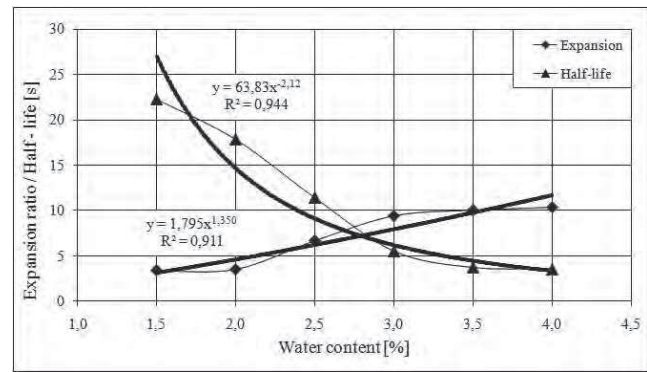
bearing flexible layer. It can also decrease the thickness of the upper bitumen layers. And lower the production time.

The deep recycling with foamed bitumen is widely used. Examples are: Africa and Australia. There, the impact of temperatures below 0°C (frost) and water on the road construction is not significant. Consequently, only tensile strength retained (TRS) is usually done. TRS is a ratio of the values of indirect tensile strength before and after soaking pavement samples in water. However, in Poland the weather conditions are more severe (due to water and frost interaction). As far as we know, for the pavement with foamed bitumen (regarding its water and frost resistance) no detailed data is available for moderate climate. Thus, before introducing this technology on the market, it is necessary to assess its water and frost resistance. It should be done in a range which broadens the existing requirements. And should be specifically prepared for this innovative technology.

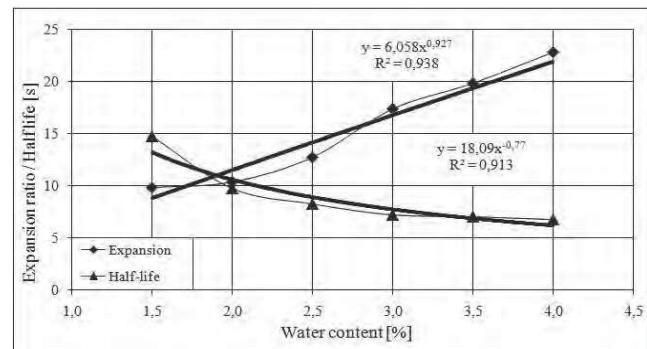
2. Tested material

2.1. Foamed bitumen tests

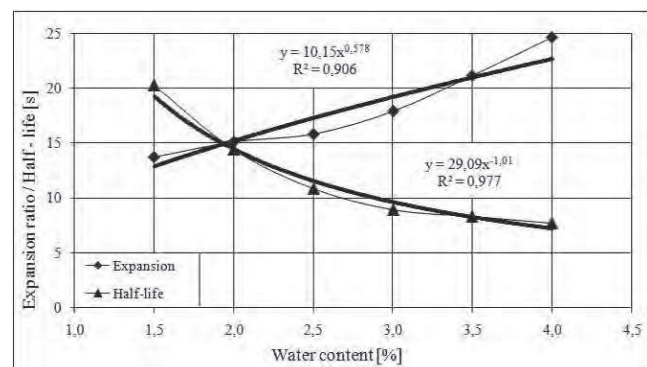
An important step of the tests was to preliminarily determine the suitability of bitumen applied for the foaming technology. The tests were performed on four kinds of road bitumen: 50/70 from Plock (50/70P), 160/220 from Trzebinia (160/220T) and two kinds of bitumen manufactured by the Nynas company (50/70N and Nyfoam 80). The suitability analysis focused on the basic properties and foaming parameters. The test results are presented in Figures 1a – 1d. From the analysis of the results [1, 2], we conclude that the Nyfoam 80 bitumen (Fig. 1d) has the most favourable foaming parameters. Its expansion ratio WE = 15.1 and half – life of the bitumen foam $t_{1/2}$ = 14.4 s. Thus, its application should guarantee high physical and mechanical parameters of the pavement.



b)

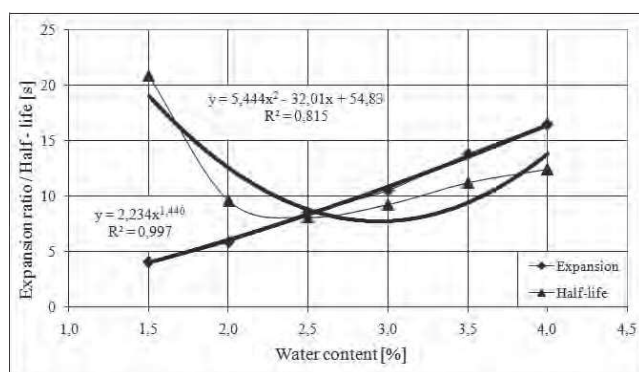


c)



d)

Fig. 1. Foamed bitumen characteristics for the following kinds of bitumen: a) 50/70P, b) 160/220T, c) 50/70N, d) Nyfoam 80



a)

2.2. The composition of the recycled pavement mixes

The laboratory tests were carried out on the mineral mix from the modernised construction layers with the addition of foamed bitumen. And, alternatively, with bitumen emulsion intended to form the pavement layer. Cement and water were also added to the recycled mix. It was done in order to obtain optimal compaction conditions.

The designed mineral mix of the recycled pavement contained 48% of milled asphalt layers, 22% of the existing stone base and 30% of a new material –

0/4 mm dolomite aggregate. The addition of cement to the mix was based on the strength tests. It equalled 2.0% in relation to its mass. Cement was used to increase the content of the fraction below 0.075 mm in the recycled material.

The designed recycled mineral mix met the grading criteria for both: the mineral mixes in the recycling technology with foamed bitumen, and for the M-C-E mixes (Fig. 2); it also complied with requirements [3] [4].

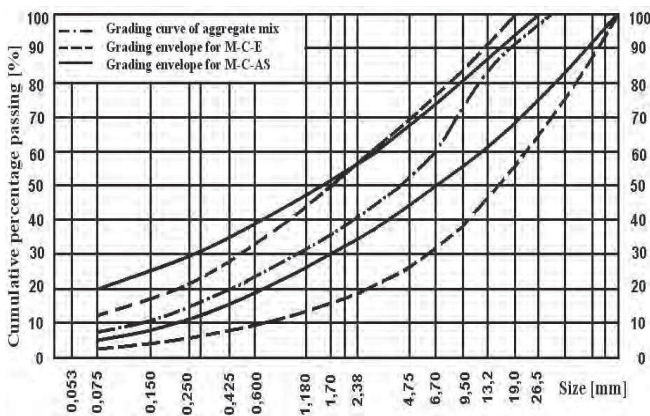


Fig. 2. Grading curves of the mineral mix for the production of pavements in the recycling technology with foamed bitumen and bitumen emulsion

The laboratory tests were performed on two kinds of mineral – bitumen mixes. In the first kind of the mineral – bitumen mix foamed bitumen from the Nyfoam 80 bitumen with a 2.0% addition of water (M-C-AS) was used. Its choice was based on the analysis of the preliminary test results. In the other mix (M-C-E) cationic slow – curing bitumen emulsion K3-60 was used. The foamed bitumen content was 2.0%, 2.5% and 3.0% (m/m). In order to properly compare the recycled pavement mix, the same amount of bitumen binder (bitumen precipitated from bitumen emulsion) as in the foamed bitumen mixes was used. However, due to the fact that measurements were conducted for K3-60 bitumen emulsion (whose bitumen content in emulsion was 60%), emulsion was added according to the technical guidelines [4]. The percentage of the added emulsion was: 3.4%, 4.2% and 5.0%. That resulted in bitumen content of 2.0%, 2.5% and 3.0%, respectively.

2.3. Methodology and analysis of the test results

The aim of this investigation was to determine the impact of foamed bitumen on the mechanical properties of pavement made with the deep cold recycling technology (M-C-AS); also to determine its water and frost resistance. Reference tests were made for the recycled mix in which bitumen emulsion (M-C-E) was used.

The experiment was carried out in two stages. The first stage was focused on the basic physical and mechanical properties with considering the kind of binder used. In the second one the water and frost resistance of the pavement was determined.

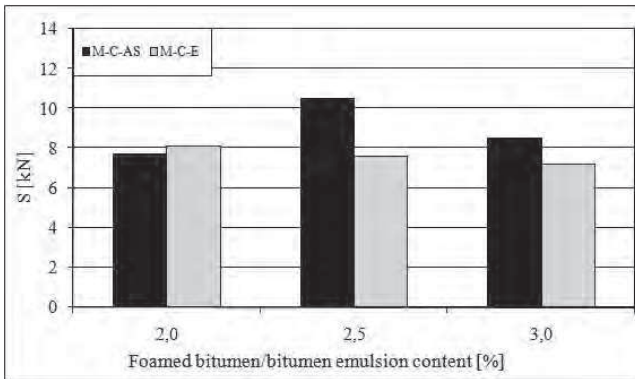
It was important to assess the homogeneity of the conducted experiment. The measurements were taken only for samples with void fraction content ranged between ($V - 2s$; $V + 2s$), where V – mean void fraction content in the pavement, s – standard deviation. The tests were performed on series of 9 samples. The presented results are the mean values.

For the designed mixes the basic physical and mechanical properties were determined. That included: stability against deformation, Marshall stiffness, indirect tensile strength, void fraction content and static creep modulus.

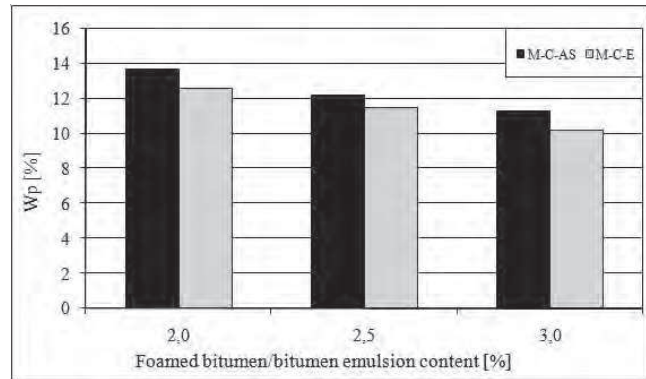
The results of the laboratory tests for both mixes are presented in Figure 3. The description is as follows: Marshall stability (S), deformation (E) and stiffness (S_z), indirect tensile strength (ITS), void fraction content (W_p) and static creep modulus (MS) depending on the kind of bitumen binder.

The increase in the binder content (foamed bitumen and bitumen emulsion) led to an increase in indirect tensile strength. The use of foamed bitumen resulted in about 10% rise in indirect tensile strength as compared to binder in which bitumen emulsion was used.

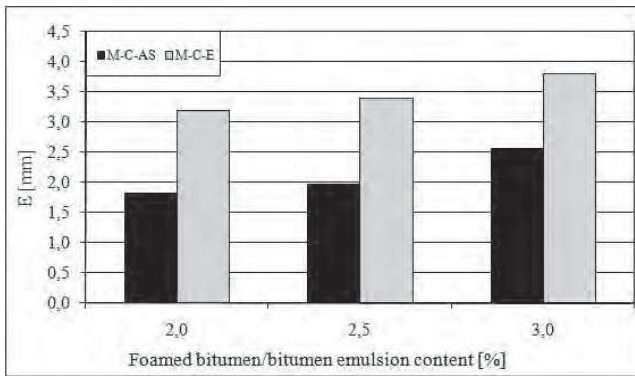
The stability of the recycled pavement and foamed bitumen content is different. An increase in foamed bitumen content to 2.5% resulted in an increase in stability. However, the application of more bitumen led to a decrease in stability. In the case of bitumen emulsion pavement stability decreased when more binder was used. The pavement stability was highest for the foamed bitumen content of 2.5%; and higher than in the case of 2% bitumen emulsion content.



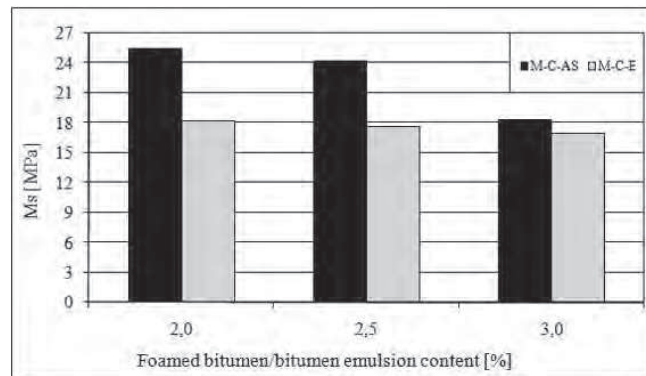
a)



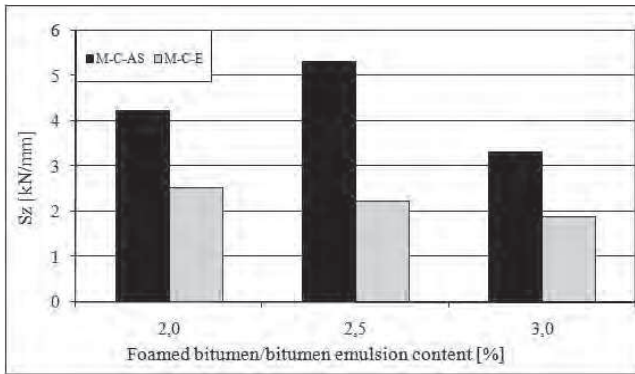
e)



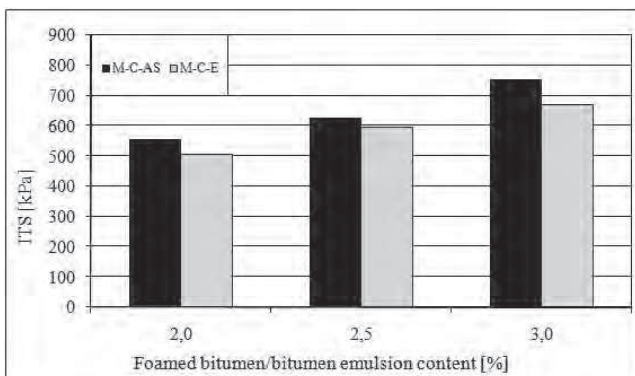
b)



f)



c)



d)

Fig. 3. Physical and mechanical properties of the recycled pavement mixes are depending on the kind of bitumen binder: a) Marshall stability, b) Marshall deformation, c) Marshall stiffness, d) indirect tensile strength, e) void fraction content, f) static creep modulus

The pavement with foamed bitumen has lower Marshall deformations as compared to pavement with bitumen emulsion. At the same time its more resistant to plastic deformations under the traffic load. It is also confirmed with the analysis of Marshall stiffness of the pavement with foamed bitumen. The Marshall stiffness values from the tests prove that the application of this kind of bitumen binder enables to obtain the pavement structure which is more resistant. Marshall stiffness for the foamed bitumen content of 2.5% was 5.33 kN/mm in comparison to the highest value of 2.53 kN/mm for the 2.0% content of bitumen from bitumen emulsion.

These pavements have higher values of the static creep than bitumen emulsion. The values of the static creep decrease as more bitumen binder is used, regardless of its kind. The static creep does not quite depend on binder. Decreasing this concentration led to a significant increase in the values of the static creep as opposed to the case when bitumen emulsion was used.

The tests from the first stage show, that if we use the foamed bitumen, the properties of the recycled pavement are advantageous compared to bitumen emulsion.

The favourable test results of the physical and mechanical properties of the pavement produced with the recycled technology with foamed bitumen are However, its not sufficient to introduce this road engineering technology in Poland. Asits also necessary to determine water and frost resistance of this kind of pavement. That was done in the second step of an investigation.

- In order to assess water and frost resistance of mineral mixes with foamed bitumen (M-C-AS) and reference mineral – cement – emulsion mixes (M-C-E), the following parameters were determined:
- indirect tensile strength after soaking with water (ITSwater),
 - tensile strength retained TSR [5],
 - resistance to low temperature cracking according to the Finnish PANK 4302 standard [6],
 - indirect tensile strength after curing in water and frost according to the American guidelines, e.g. the AASHTO T283 method [7, 8].

The test results due to weather conditions are presented in Table 1 (as reference samples). The relation between indirect tensile strength at -2°C according to PANK 4302 and the foamed bitumen and bitumen emulsion content are shown in Figure 4. Figure 5 presents the same, but for indirect tensile strength after curing only in water and in water and frost according to AASHTO T283.

Table 1. Test results of water and frost resistance of the recycled pavement with foamed bitumen and bitumen emulsion

No.	The kind of the recycled pavement mix	M-C-AS			M-C-E		
	Bitumen (AS) content / bitumen in bitumen emulsion (EA) content [%]	2.0	2.5	3.0	2.0	2.5	3.0
	Cement content [%]	2.0					
The properties of the recycled pavement mixes							
1	ITS _{water} [kPa]	404	470	604	344	421	497
2	TSR	0.73	0.75	0.82	0.68	0.71	0.74
3	Indirect tensile strength at -2°C according to PANK 4302 [MPa]	0.7	0.8	1.1	0.7	0.9	1.0
Indirect tensile strength ratio at 20°C according to AASHTO T283 [%]							
4a	After curing in water	71.2	78.3	79.7	67.4	69.5	71.8
4b	After curing in water and frost	62.7	70.2	72.9	59.6	62.2	65.1

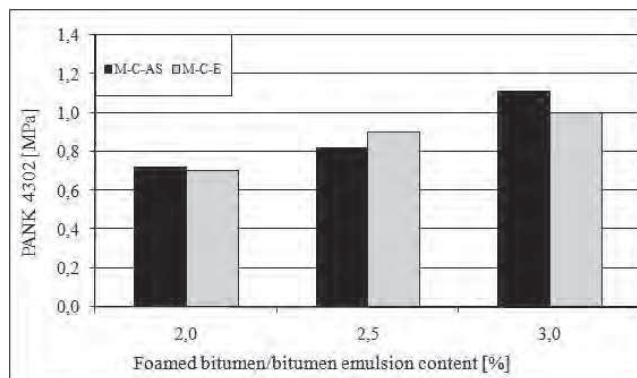


Fig. 4. Indirect tensile strength of the recycled pavement according to PANK 4302

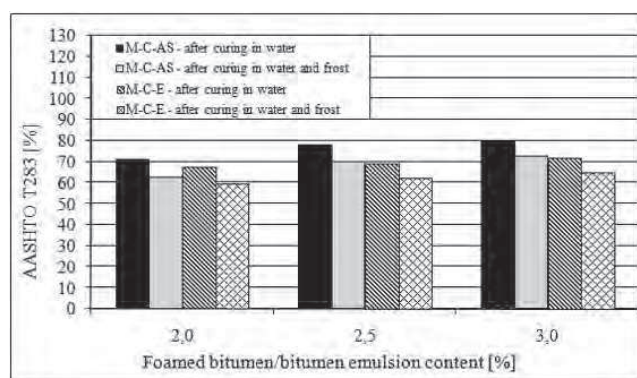


Fig. 5. Indirect tensile strength ratio of the recycled pavement according to AASHTO T283

Pavements made with foamed bitumen have higher tensile strength retained in comparison to bitumen emulsion. TSR increases with the foamed bitumen content. It should be noted that According to the criterion proposed by Jenkins [5] the recycled pavement is water resistant if TSR exceeds 0.70. This criterion is met only for the pavement with foamed bitumen. The use of bitumen emulsion does not guarantee required water resistance of the pavement. Since the TSR values are lower than 0.70.

The tests confirmed, that resistance to low temperature cracking of the recycled pavement for foamed bitumen and bitumen emulsion is comparable for the same binder contents.

A thorough assessment of water and frost resistance was performed according to AASHTO T283. The pavement with foamed bitumen turned out to be water resistant. But the pavement with bitumen emulsion did not meet the required criterion. Its indirect tensile strength ratio after curing in water was lower than 70% regardless of the emulsion content used. Similarly, the pavement with bitumen emulsion was not water and frost resistant. The indirect tensile strength ratio was below the required value of 70%. At the maximal

bitumen emulsion content this ratio was only 65.1%. However the foamed bitumen content in the recycled pavement of at least 2.5% ensured its water and frost resistance. It was observed that rising foamed bitumen content led to an increase in resistance to the investigated climatic factors.

The tests of the effects of water and low temperatures on the recycled pavement prove that the use of foamed bitumen enables to ensure better resistance to these destructive factors. It can also be concluded, that the water resistance criterion of the recycled pavement based on the TSR parameter should be broadened. It should include, (for example) the proposed AASHTO T283 method.

3. Conclusions

From the laboratory tests of the recycled pavement with foamed bitumen and bitumen emulsion, the following conclusions can be drawn:

1. Only these kinds of bitumen that possess proper foaming parameters can be used in the foaming technology, for example the Nyfoam 80 bitumen.
2. An increase in the foamed bitumen content from 2.0% to 3.0% results in an increase in indirect tensile strength of the recycled pavement.
3. The stability is highest at the binder concentration of 2.5%.
4. The use of more binder results in decrease of stability in recycled pavement.
5. The recycled pavement with the 2.5% foamed bitumen content has more favourable mechanical properties, higher Marshall stability and stiffness than bitumen emulsion; that is regardless of the binder content.
6. The use of foamed bitumen ensures higher water and frost resistance than bitumen emulsion.
7. The water resistance criterion based only on the TSR parameter is insufficient; it should be

broadened to include the proposed AASHTO T283 method.

8. The recycled pavement with foamed bitumen has higher static creep than bitumen emulsion.
9. The use of foamed bitumen in the deep cold recycling technology should guarantee higher resistance to plastic deformation.

The favourable laboratory tests indicate, that there is a need to continue research in this area. In particular, its necessary to verify laboratory test results in the field. More research should be done and data collected before introducing this technology on the market

References

- [1] Iwański M. (2006): *Podbudowa z asfaltem spienionym*, „Drogownictwo” 3, s. 97-106.
- [2] Iwański M., Chomicz A. (2006): *Przydatność do spienienia asfaltów drogowych stosowanych w Polsce*, „Drogownictwo” 8, s. 267-271.
- [3] Wirtgen Cold Recycling Manual (2004): *Wirtgen GmbH*. Windhagen. Germany.
- [4] Zawadzki J., Matras J., Mechowski T., Sybilski D. (1999): *Warunki techniczne wykonywania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE)*. Zeszyt 61 IBDiM, Warszawa.
- [5] Jenkins K.J., Collings D.C, Thesey H.L., Long F.M. (2003): *Interim Technical Guideline: Design and Use of Foamed Bitumen Treated Materials*. Les Sampson of Asphalt Academy (ed). Asphalt Academy, Pretoria, South Africa. ISBN 0-7988-7743-6.
- [6] PANK 4302 Standard Asphalt pavements. Low temperature resistance. Method of determining indirect tensile strength.
- [7] Judycki J., Jaskuła J. (1997): *Badania odporności betonu asfaltowego na oddziaływanie wody i mrozu*, „Drogownictwo” 12, s. 374-378.
- [8] Iwański M. (1999): *Wodo- i mrozoodporność betonu asfaltowego z kruszywem kwarcytowym*, V Konferencja Międzynarodowa „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”. Kielce, 11-12 maja 1999, s. 77-84.

Marek Iwański
Anna Chomicz-Kowalska

Odporność na oddziaływanie wody i mrozu podbudowy w technologii recyklingu na zimno

1. Wprowadzenie

Stale pogarszający się stan techniczny asfaltowych nawierzchni dróg jest jednym z najważniejszych problemów drogownictwa w Polsce. Zwiększający się udział pojazdów ciężkich w ogólnej strukturze ruchu drogowego, wzrost obciążenia na oś pojazdów ze 100 kN na 115 kN, starzenie się materiałów konstrukcji nawierzchni, brak przystosowania nawierzchni do warunków klimatycznych panujących w Polsce, a także wyczerpanie przez nawierzchnie zakładanego okresu eksploatacji są głównymi przyczynami przyspieszonej degradacji nawierzchni na znacznym obszarze sieci drogowej.

W przypadku mocno zniszczonych nawierzchni asfaltowych, na których występują koleiny lub pęknięcia zmęczeniowe, coraz częściej stosowaną metodą naprawy jest recykling na zimno. Obecnie w Polsce rozpowszechniona jest technologia recyklingu na zimno konstrukcji nawierzchni z zastosowaniem mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (M-C-E). Jednakże ciągły wzrost prac w zakresie modernizacji eksploatowanej sieci drogowej w naszym kraju, związany z koniecznością poprawy nośności konstrukcji nawierzchni, wskazuje na potrzebę wdrożenia do krajowego wykonawstwa bardziej nowoczesnej technologii recyklingu na zimno, w której zamiast emulsji asfaltowej stosowany jest asfalt spieniony. Wykorzystanie tego lepiszcza asfaltowego pozwala uzyskać większą trwałość konstrukcji nawierzchni drogowej przy oddziaływaniu agresywnego obciążenia ruchem i coraz bardziej niekorzystnych warunków klimatycznych [1].

2. Badany materiał

2.1. Badania asfaltu spienionego

Do technologii spienienia w drogownictwie światowym stosowane są asfalty o różnej penetracji. Istotnym elementem wykonanych badań było na wstępie określenie przydatności stosowanych w Polsce asfaltów do technologii spienienia. Badania oceny przydatności asfaltów obejmowały określenie

podstawowych ich właściwości oraz parametrów spienienia. Na podstawie badań [2, 4] stwierdzono, że asfalt Nyfoam 80 charakteryzuje się najkorzystniejszymi parametrami spienienia: współczynnikiem ekspansji $WE = 15,1$ oraz czasem połowicznego rozpadu piany asfaltowej $t_{1/2} = 14,4$ s. Tym samym zastosowanie go podczas recyklingu głębokiego na zimno powinno gwarantować uzyskanie podbudowy o wysokich parametrach fizyko mechanicznych.

2.2. Skład ramowy recyklowanych mieszanek podbudowy

W wykonanych badaniach laboratoryjnych zastosowano mieszankę mineralną pochodzącą z modernizowanych warstw konstrukcyjnych nawierzchni z dodatkiem asfaltu spienionego i alternatywnie emulsji asfaltowej, przeznaczoną na warstwę podbudowy w technologii recyklingu głębokiego na zimno. Recyklowana mieszanka zawierała również dodatek 2,0% cementu oraz wody w celu uzyskania optymalnych warunków zagęszczania. Zawartość asfaltu spienionego wynosiła odpowiednio 2,0%, 2,5% oraz 3,0% (m/m). Aby możliwe było prawidłowe porównywanie recyklowanych mieszanek podbudowy z asfaltem spienionym z mieszanką M-C-E, w badaniach laboratoryjnych mieszanek M-C-E stosowano tę samą ilość lepiszcza asfaltowego (asfaltu wytrąconego z emulsji) co w mieszankach z asfaltem spienionym. Jednakże ze względu na fakt, iż w badaniach wykorzystywana jest kationowa emulsja asfaltowa wolnorozpadowa K3-60 (60% asfaltu w emulsji asfaltowej), w związku z tym dozowano ją zgodnie z warunkami technicznymi [4] w ilości 3,4%, 4,2% oraz 5,0%, co w konsekwencji daje nam odpowiednio asfaltu 2,0%, 2,5% oraz 3,0%.

2.3. Metodyka oraz analiza rezultatów badań

Celem badań było określenie wpływu ilości asfaltu spienionego na właściwości mechaniczne podbudowy wykonanej w technologii recyklingu głębokiego na zimno, oraz określenie jej odporności na oddziaływanie wody i mrozu. Badania kontrolne

wykonano dla mieszanki recyklowanej, w której zastosowano emulsję asfaltową.

Dla zaprojektowanych i wykonanych recyklowanych mieszanek podbudowy z asfaltem spienionym oraz kontrolnych mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych określono podstawowe właściwości fizykomechaniczne, takie jak: stabilność odkształcenie i sztywność wg Marshalla, wytrzymałość na pośrednie rozciąganie, zawartość wolnych przestrzeni oraz moduł sztywności według pełzania pod obciążeniem statycznym.

Analiza rezultatów badań recyklowanej podbudowy pozwoliła stwierdzić, że wraz ze wzrostem ilości lepiszcza (asfaltu spienionego i emulsji asfaltowej) wzrasta jej wytrzymałość na pośrednie rozciąganie. Należy zaznaczyć, że zastosowanie w podbudowie asfaltu spienionego powoduje około 10-procentowy wzrost jej wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, przy takiej samej zawartości lepiszcza, niż kiedy stosowano emulsję asfaltową. Inny charakter przybiera zależność stabilności recyklowanej podbudowy od ilości asfaltu spienionego. Zanotowano istotną zależność – wzrost koncentracji asfaltu spienionego do 2,5% powoduje wzrost stabilności podbudowy, a dalsze jego zwiększenie powoduje obniżenie wartości badanej charakterystyki. Natomiast zastosowanie emulsji asfaltowej powoduje, że stabilność podbudowy maleje wraz ze zwiększeniem koncentracji lepiszcza.

Istotnym efektem badań jest stwierdzenie, że w zakresie stosowanych koncentracji lepiszcza asfaltowego podbudowa z asfaltem spienionym charakteryzuje się mniejszym odkształceniem wg Marshalla od podbudowy z emulsją asfaltową. Tym samym będzie ona bardziej odporna na deformacje plastyczne pod wpływem oddziałującego na nawierzchnię obciążenia ruchem pojazdów. Właściwość tę potwierdza również analiza sztywności wg Marshalla podbudowy z asfaltem spienionym. Określone wartości sztywności wg Marshalla podbudowy z asfaltem spienionym dla stosowanych w badaniach koncentracji wskazują jednoznacznie, że zastosowanie tego rodzaju lepiszcza asfaltowego pozwala uzyskać większą odporność tego rodzaju podbudowy na oddziaływanie ruchu pojazdów niż kiedy w jej składzie stosowano emulsję asfaltową.

Dla oceny odporności na oddziaływanie wody oraz mrozu mieszanek mineralnych z asfaltem spienionym oraz kontrolnych mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (M-C-E) przeznaczonych na warstwę podbudowy w technologii recyklingu głębokiego na zimno wykonano oznaczenia: wytrzymałość

na pośrednie rozciąganie po nasączeniu wodą, wskaźnik odporności na oddziaływanie wody TSR, odporność na spękania niskotemperaturowe zgodnie z fińską normą PANK 4302 [6] oraz wskaźniki wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po procesie pielęgnacji w wodzie i mrozie, zgodnie z procedurami amerykańskimi, wg metody AASHTO T283 [7, 8].

Wykonane badania pozwoliły stwierdzić, że podbudowa wykonana w technologii recyklingu z asfaltem spienionym, w badanym zakresie lepiszcza charakteryzuje się większymi wartościami wskaźnika TSR niż kiedy stosowano emulsję asfaltową. Wartości wskaźnika wzrastają wraz z koncentracją asfaltu spienionego.

Kompleksową ocenę odporności na oddziaływanie wody i mrozu badanych podbudów uzyskano na podstawie oznaczeń wg AASHTO T283. Podbudowa z asfaltem spienionym okazała się odporna na oddziaływanie wody, a podbudowa z emulsją asfaltową niestety nie spełniała tego kryterium, ponieważ jej wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie pośrednie po pielęgnacji w wodzie był mniejszy od 70%, niezależnie od ilości zastosowanej emulsji. Podbudowa z emulsją asfaltową wykazała również brak odporności na oddziaływanie wody i mrozu, gdyż wartości wskaźnika wytrzymałości na rozciąganie pośrednie były mniejsze od wymaganej wartości 70%. Należy podkreślić, że przy maksymalnej koncentracji emulsji asfaltowej wynosił on tylko 65,1%. Natomiast zastosowanie w recyklowanej podbudowie co najmniej 2,5% asfaltu spienionego zapewniło jej odporność na oddziaływanie wody i mrozu. Wraz ze wzrostem zawartości asfaltu spienionego odporność podbudowy na badane czynniki klimatyczne wzrasta.

Wykonane badania w zakresie oddziaływania wody i niskich temperatur na recyklowaną podbudowę pozwalają stwierdzić, że zastosowanie w jej składzie asfaltu spienionego pozwala zapewnić na wyższym poziomie jej odporność na te czynniki niszczące niż zastosowanie emulsji asfaltowej. Można również wnioskować, że kryterium odporności recyklowanej podbudowy na oddziaływanie wody tylko na podstawie wskaźnika TSR jest niewystarczające i należy je rozszerzyć na przykład o zaproponowaną metodykę AASHTO T283.

3. Wnioski

Na podstawie wykonanych badań laboratoryjnych recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym oraz emulsją asfaltową można sformułować następujące wnioski:

1. Do technologii spienienia można stosować tylko te asfalty, które charakteryzują się odpowiednimi parametrami spienienia, do takich asfaltów można zaliczyć np.: asfalt Nyfoam 80.
 2. Wraz ze zwiększeniem koncentracji asfaltu spienionego od 2,0% do 3,0% następuje wzrost wytrzymałości na pośrednie rozciąganie recyklowanej podbudowy, natomiast stabilność uzyskuje największą wartość przy koncentracji 2,5% lepiszcza, dalsze zwiększenie jego zawartości powoduje spadek stabilności recyklowanej podbudowy,
 3. Recyklowana podbudowa z asfaltem spienionym przy jego zawartości 2,5% charakteryzuje się korzystniejszymi właściwościami mechanicznymi, większą stabilnością i sztywnością wg Marshalla niż w przypadku, kiedy zastosowano emulsję asfaltową.
 4. Zastosowanie asfaltu spienionego powoduje wzrost wytrzymałości na pośrednie rozciąganie recyklowanej podbudowy w porównaniu z zastosowaniem w jej składzie emulsji asfaltowej, niezależnie od koncentracji lepiszcza.
 5. Asfalt spieniony zapewnia odporność na oddziaływanie wody i mrozu recyklowanej podbudowy na znacznie wyższym poziomie niż stosowanie emulsji asfaltowej.
 6. Kryterium odporności recyklowanej podbudowy na oddziaływanie wody tylko na podstawie wskaźnika TSR jest niewystarczające i należy je rozszerzyć o zaproponowaną metodykę AASHTO T283.
 7. Recyklowana podbudowa charakteryzuje się większym modułem statycznym pelzania wtedy kiedy w jej składzie stosowano asfalt spieniony niż gdy wykorzystano emulsję asfaltową.
 8. Zastosowanie asfaltu spienionego podczas recyklingu głębokiego na zimno powinno zapewnić uzyskanie podbudowy o wyższej odporności na deformacje plastyczne, niż kiedy stosuje się emulsję asfaltową.
- Uzyskane pozytywne wyniki badań laboratoryjnych wskazują na konieczność kontynuowania dalszych prac w zakresie trwałości recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym. Nieodzowna jest również weryfikacja rezultatów badań laboratoryjnych w terenowych warunkach pracy tego rodzaju podbudowy. Pozwoli to na zgromadzenie bazy danych umożliwiających wdrożenie tej technologii do polskiego wykonawstwa.