



ANNA CHOMICZ-KOWALSKA
Kielce University of Technology
e-mail: akowalska@tu.kielce.pl

JOANNA BARTOS
Kielce University of Technology
e-mail: jbartos@tu.kielce.pl

KRZYSZTOF MACIEJEWSKI
Kielce University of Technology
e-mail: kmaciejewski@tu.kielce.pl

EVA REMISOVA
University of Zilina
e-mail: eva.remisova@fstav.uniza.sk

JOZEF KOMACKA
University of Zilina
e-mail: jozef.komacka@fstav.uniza.sk

MICHAL HOLY
University of Zilina
e-mail: michal.holy@fstav.uniza.sk

Manuscript submitted 2019.01.28 – revised 2019.03.02,
initially accepted for publication 2019.04.08, published in June 2019

THE EFFECT OF WMA ADDITIVE ON BASIC PROPERTIES OF 35/50 AND 50/70 FOAMED ROAD BITUMEN

WPŁYW DODATKU WMA NA PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI SPIENIONYCH ASFALTÓW DROGOWYCH 35/50 I 50/70

DOI: 10.30540/sae-2019-010

Abstract

The need to use asphalt additives along with the reduction in the temperatures of asphalt mixes results mainly from the need to ensure the durability of asphalt pavements. The use of foamed asphalt for warm mix asphalt (WMA) enables reducing the temperatures of asphalt mixes by approx. 30–40°C in relation to traditional hot mix asphalt. The article presents an analysis of the impact of a liquid chemical additive that is currently used in the WMA technology on changes in foamed asphalt properties. The assessment embraced the basic features of bitumens and the parameters of the asphalt foam manufactured based on them. The base bitumen used in the testing included road asphalt 35/50 and 50/70, whereas the modification of their properties was carried out using the WMA additive content of 0.3% to 0.6% in relation to the asphalt mass. The asphalt foam parameters were measured after foaming at 155°C and with the foaming water content (FWC) of 1.5% to 3.5% with increments of 1.0%.

Keywords: foamed bitumen, WMA – Warm Mix Asphalt, FWC – Foaming Water Content

Streszczenie

Potrzeba stosowania dodatków do asfaltu wraz z obniżaniem temperatur technologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych wynika głównie z konieczności zapewnienia trwałości nawierzchni asfaltowej. Stosowanie asfaltu spienionego do technologii na ciepło (WMA) umożliwia obniżenie temperatur mieszanek mineralno-asfaltowych o około 30–40°C względem tradycyjnej technologii na gorąco. W artykule przedstawiono analizę wpływu dodatku chemicznego w postaci płynnej, który stosowany jest obecnie do technologii WMA, na zmiany właściwości asfaltów spienionych. Ocenie poddano podstawowe cechy lepkości oraz parametry wyprodukowanej na ich bazie piany asfaltowej. W badaniach jako bazowe lepkości zastosowano asfalty drogowe 35/50 oraz 50/70, natomiast do modyfikacji ich właściwości zastosowano dodatek WMA w ilości od 0,3% do 0,6% w stosunku do masy asfaltu. Pomiar parametrów piany asfaltowej przeprowadzono przy temperaturze wyjściowej asfaltu (przed spienieniem) wynoszącej 155°C oraz przy zawartości wody spieniającej (FWC – Foaming Water Content) w zakresie od 1,5% do 3,5% ze wzrostem co 1,0%.

Słowa kluczowe: asfalt spieniony, WMA – Warm Mix Asphalt, FWC – Foaming Water Content

1. INTRODUCTION

The quick increase in car traffic and the increasing requirements of road users in Poland and globally contributed to the development in the road industry of new technologies and modifiers used as additives for road bitumen to improve the performance of asphalt mixes and prolong the road pavement

1. WPOWADZENIE

Szybki wzrost natężenia ruchu samochodowego oraz coraz większe wymagania użytkowników dróg w Polsce, jak i na świecie przyczyniły się do rozwoju w drogownictwie nowych technologii i modyfikatorów stosowanych jako dodatki do asfaltów drogowych w celu poprawy właściwości użytkowych mieszanek mine-

lifetime. Bitumens are thermo-plastic materials with viscoelastic properties and in road pavements they are exposed to traffic loads in various climatic conditions [1, 2]. Due to the above, it is necessary to take into consideration the behaviour of asphalt mixes in both low and high service temperatures [3]. Ensuring increased durability requires increasing the road pavement resistance to permanent deformation, cracking, ageing, fatigue and impact of external factors [4].

The Warm Mix Asphalt technologies are currently gaining in popularity. A substantial benefit of using this type of technologies is the reduction in the amount of energy needed to manufacture the mix asphalt. In the hot mix asphalt technology, high temperature is required to lower the bitumen's viscosity that allows obtaining the suitable bitumen enclosure and workability enabling the correct asphalt mix compaction. The currently used method of manufacturing asphalt mixes with lowered temperature can be divided into two primary groups: asphalt mixes using additives for the bitumen (affecting the bitumen's rheological properties, facilitating aggregate coating, improving workability) and mixes utilising the asphalt foaming phenomenon (with the addition of water) [6]. Another method of asphalt foaming is the use of zeolites which are classified as aluminosilicates due to their chemical structure. The mineral's crystalline structure allows for water absorption [8], while asphalt foaming using a zeolite additive is possible thanks to the slow release of water from their structure, thereby causing the formation of asphalt foam [9]. Today, the market features many asphalt foaming technologies and the most popular one is based on foaming hot asphalt with cold water under pressure in a foaming chamber, where the process is executed in a controlled environment. As result, it is possible to obtain asphalt foam with low viscosity and ability to coat the aggregate in lowered temperatures. In the process of foaming and manufacturing mix asphalt with foamed asphalt, the hot bitumen is affected by water vapour and atmospheric pressure, which can potentially affect the bitumen's ageing.

Currently, there are attempts at using various methods allowing for process temperature reduction at the same time during the construction of asphalt roads including, among others, foaming of bitumens and the use of WMA additives [5, 10]. The purpose of this paper is to present the results of testing the

ralno-asfaltowych (mma) oraz wydłużenia okresu eksploatacji nawierzchni drogowej. Lepiszczka asfaltowe są materiałami termoplastycznymi o właściwościach lepkosprężystych, a w nawierzchniach drogowych narażone są na obciążenie ruchem w różnych warunkach klimatycznych [1, 2]. W związku z tym należy uwzględnić zachowanie się mieszanek mineralno-asfaltowych zarówno w niskich, jak i wysokich temperaturach eksploatacyjnych [3]. Zwiększenie trwałości wymaga zwiększenia odporności nawierzchni na trwałe odkształcenia, pęknięcie, starzenie, zjawisko zmęczenia oraz na oddziaływanie czynników zewnętrznych [4].

Popularność zdobywają technologie mieszanek wytwarzanych na ciepło (WMA – Warm Mix Asphalt). Istotną korzyścią ze stosowania tych technologii jest zmniejszenie ilości energii potrzebnej przy ich produkcji. W technologii wytwarzania mma „na gorąco” (HMA – Hot Mix Asphalt) wysoka temperatura niezbędna jest do obniżenia lepkości lepiszcza, pozwalającej uzyskać odpowiednie otoczenie mieszanki mineralnej lepiszczem oraz urabialność zapewniającą poprawne zagęszczenie mieszanki. Stosowane obecnie metody wytwarzania mieszanek o obniżonej temperaturze można podzielić na dwie zasadnicze grupy: wykorzystujące dodatki do lepiszcza asfaltowego (wpływające na właściwości reologiczne lepiszcza, ułatwiające otaczanie kruszywa, poprawiające urabialność) oraz wykorzystujące zjawisko spieniania asfaltu (wprost dodatkiem wody) [6]. Inną metodą spieniania asfaltów jest stosowanie dodatku zeolitów, które z uwagi na swoją chemiczną budowę zaliczane są do grupy krzemianów. Budowa krystaliczna tego minerału pozwala na absorpcję wody [8], a spienianie asfaltu dodatkiem zeolitów jest możliwe dzięki powolnemu uwalnianiu wody z ich struktury, powodując powstanie piany asfaltowej [9]. Dziś rynek oferuje wiele technologii spieniania asfaltu, a najpopularniejsza z nich polega na spienianiu gorącego asfaltu zimną wodą pod ciśnieniem w komorze spieniania, gdzie proces ten jest realizowany w sposób kontrolowany. W wyniku tego powstaje piana asfaltowa o małej lepkości i zdolności otaczania kruszywa w obniżonych temperaturach. W procesie spieniania oraz wytwarzania mieszanki z asfaltem spienionym na gorące lepiszcze asfaltowe oddziałuje jednocześnie para wodna oraz powietrze atmosferyczne, co potencjalnie może mieć wpływ na przebieg starzenia technologicznego lepiszcza.

Podjęmowane są próby jednoczesnego stosowania różnych metod pozwalających redukować temperatury technologiczne podczas budowy dróg asfaltowych, w tym m.in. spienianie lepiszczy asfaltowych oraz użycie dodatków WMA [5, 10]. Przedmiotem niniejszego

impact of the WMA additive on the properties of (non-foamed) road asphalts and asphalt subjected to water foaming.

2. MATERIALS AND RESEARCH METHODOLOGY

The starting material for the laboratory testing included road asphalts 35/50 and 50/70 derived from a domestic manufacturer. The WMA additive was the liquid Rediset LQ agent, which is a mix of surface-active substances, organic additives and other compounds affecting the rheological and adhesive properties, allowing for lowering the asphalt mix manufacturing temperature by 20–30°C [7]. It was dosed into hot bitumen in the amount of 0.3% to 0.6% in relation to the asphalt mass, with increments of 0.15% for basic testing of non-foamed and foamed bitumens, as well as of 0.3% during measurements of the asphalt foam's physical properties (expansion and half-life).

The properties of bitumens including a variable WMA additive content were tested both prior to and after foaming with the use of 2.5% foamed water.

The scope of testing related to determining the impact of the WMA additive on the properties of non-foamed and foamed asphalts features several stages. The first stage featured the determination of the basic parameters of asphalts prior to foaming, i.e. penetration at 25°C (Pen_{25}) acc. to PN-EN 1426, softening point (T_{PIK}) acc. to PN-EN 1427 and breaking point (T_{Fraass}) PN-EN 12593. Then, the bitumens were foamed using 2.5% water and thereafter the foaming water remains were removed by heating the foamed bitumen in a dryer at 140°C for 3 hours in slender vessels, including 5 cycles of intense mixing. No substantial bitumen foaming was observed after this treatment. Then, the prepared samples featured designation of the same basic parameters as in the case of non-foamed bitumens. The last stage of testing featured the measurement of the asphalt foam's physical features, i.e. ER – Maximum Expansion Ratio and HL – Half Life with varying foaming water content, i.e. 1.5%, 2.5% and 3.5%. Then, the obtained results were used to develop the mathematical dependencies between the ER and HL dependent variables and the tested FWC factor for each of the tested bitumens.

The results of the aforementioned designations were analysed in terms of the dependent variables:

- bitumen: meaning the type of the base bitumen: 35/50 or 50/70;

artykułu jest przedstawienie wyników badań wpływu zastosowania dodatku WMA na właściwości asfaltów drogowych (niespianionych) i poddanych procesowi spieniania wodą.

2. MATERIAŁY I PROCEDURY BADAWCZE

W badaniach laboratoryjnych jako materiał wyjściowy wykorzystano asfalty drogowe 35/50 i 50/70 pochodzące od krajowego producenta. Jako dodatek WMA stosowano płynny środek Rediset LQ, który jest mieszaniną substancji powierzchniowo aktywnych, dodatków organicznych i innych związków wpływających na własności reologiczne oraz adhezyjne, pozwalający uzyskać obniżenie temperatury produkcji mma o 20–30°C [7]. Dozowano go do gorącego lepiszcza w ilości od 0,3% do 0,6% w stosunku do masy asfaltu, z krokiem co 0,15% dla badań podstawowych na lepiszczach niespianionych i po spienieniu oraz co 0,3% na etapie pomiaru cech fizycznych piany asfaltowej (ekspansji oraz okresu półtrwania).

Właściwości lepiszczy zawierających zmienną ilość dodatku WMA badano zarówno przed, jak i po spienieniu z zastosowaniem 2,5% wody spieniającej.

Zakres prac badawczych związanych z ustaleniem wpływu dodatku WMA na właściwości asfaltów niespianionych i spianionych obejmował kilka etapów. W pierwszym określono podstawowe parametry asfaltów przed spienieniem, tj. penetrację w 25°C (Pen_{25}) według PN-EN 1426, temperaturę mięknięcia (T_{PIK}) według PN-EN 1427 oraz temperaturę łamliwości (T_{Fraass}) PN-EN 12593. Następnie lepiszcza spieniono dodatkiem 2,5% wody, a później usunięto pozostałości wody spieniającej poprzez ogrzewanie spienionego lepiszcza w suszarce w temperaturze 140°C przez 3 godziny w smukłych naczyniach, mieszając je intensywnie pięciokrotnie. Po zabiegach tych nie obserwowano już istotnego pienienia. Następnie na tak przygotowanych próbkach oznaczono te same podstawowe parametry co dla lepiszczy asfaltowych niespianionych. Ostatnim etapem prac badawczych był pomiar cech fizycznych piany asfaltowej, tj. ER – maksymalnej ekspansji (Maximum Expansion Ratio) oraz HL – okresu półtrwania (Half Life) przy zmianie ilości wody spieniającej (FWC – Foaming Water Content), tj. 1,5%, 2,5% i 3,5%. Następnie na podstawie uzyskanych wyników opracowano zależności matematyczne pomiędzy zmiennymi zależnymi ER i HL a badanym czynnikiem FWC dla każdego z badanych lepiszczy.

Wyniki powyższych oznaczeń były analizowane w kontekście zmiennych niezależnych:

- type: specifying whether the bitumen was subjected to foaming: *N* (non-foamed) or *F* (foamed);
- WMA: meaning the content of WMA additive: 0.00%, 0.30%, 0.45%, 0.60%.

- bitumen: oznaczającej rodzaj bazowego lepiszcza asfaltowego: 35/50 lub 50/70;
- type: wskazującą czy lepiszcze asfaltowe było poddane spienieniu: *N* (non-foamed) lub *F* (foamed);
- WMA: oznaczającą ilość zastosowanego dodatku WMA: 0,00%, 0,30%, 0,45%, 0,60%.

3. RESULTS AND ANALYSIS

3.1. Properties of non-foamed and foamed bitumens

The average results of designation of the basic parameters for non-foamed and foamed bitumens are presented in Figures 1 and 2. Figure 1a–1c present the average values of tested parameters, whereas Figure 2 features a graphic representation of the impact of the analysed factors (with/without additive, non-foamed, foamed).

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

3.1. Właściwości lepiszczy asfaltowych niespionych i spionych wodą

Średnie wyniki oznaczeń podstawowych parametrów dla lepiszczy niespionych oraz spionych przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Na rysunku 1a–1c pokazano średnie wartości zbadanych parametrów, natomiast na rysunku 2 zaprezentowano graficznie wpływ analizowanych czynników (bez/z dodatkiem, niespiony/spiony).

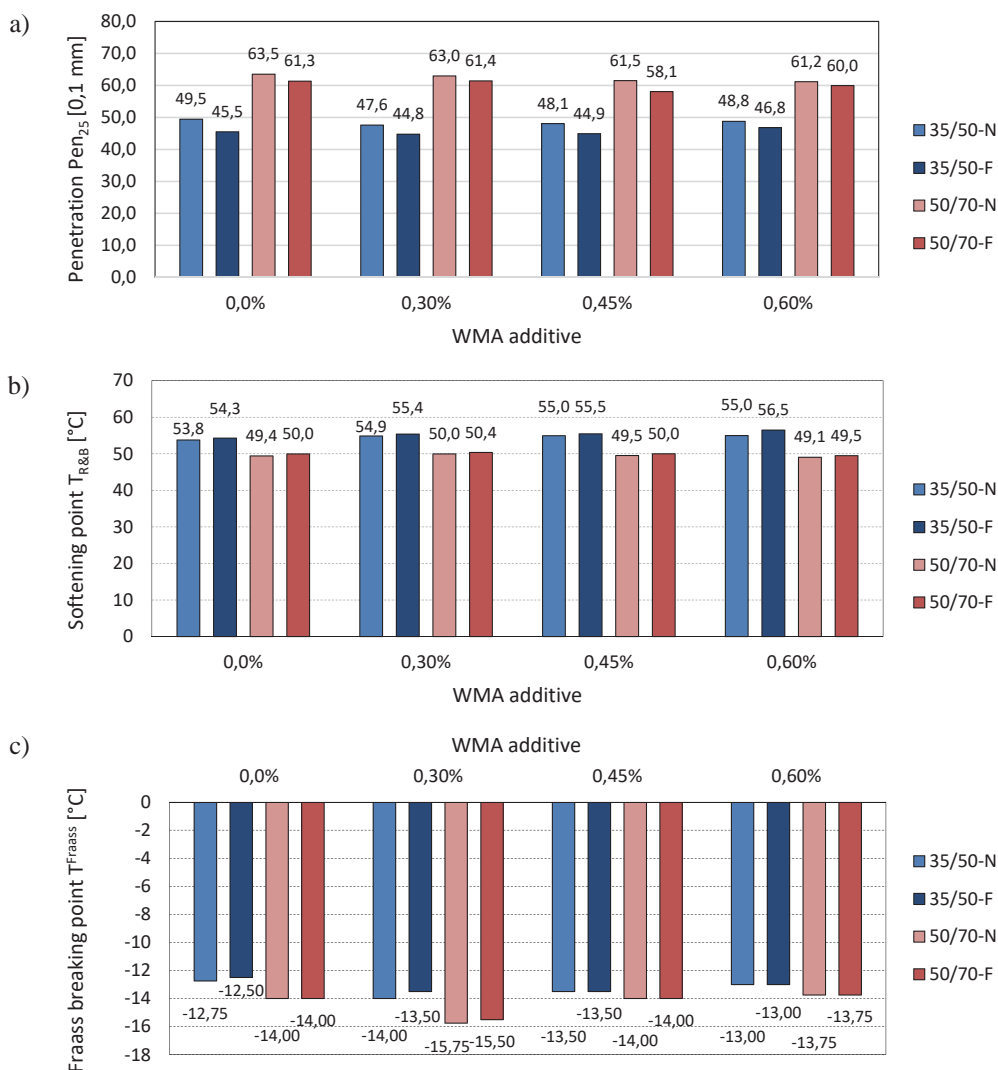


Fig. 1. Results of parameter designations: a) Pen₂₅ b) T_{R&B} c) T_{Fraass} for non-foamed and foamed asphalts

Rys. 1. Wyniki oznaczeń parametrów: a) Pen₂₅ b) T_{R&B} c) T_{Fraass} dla asfaltów niespionych oraz poddanych procesowi spieniania

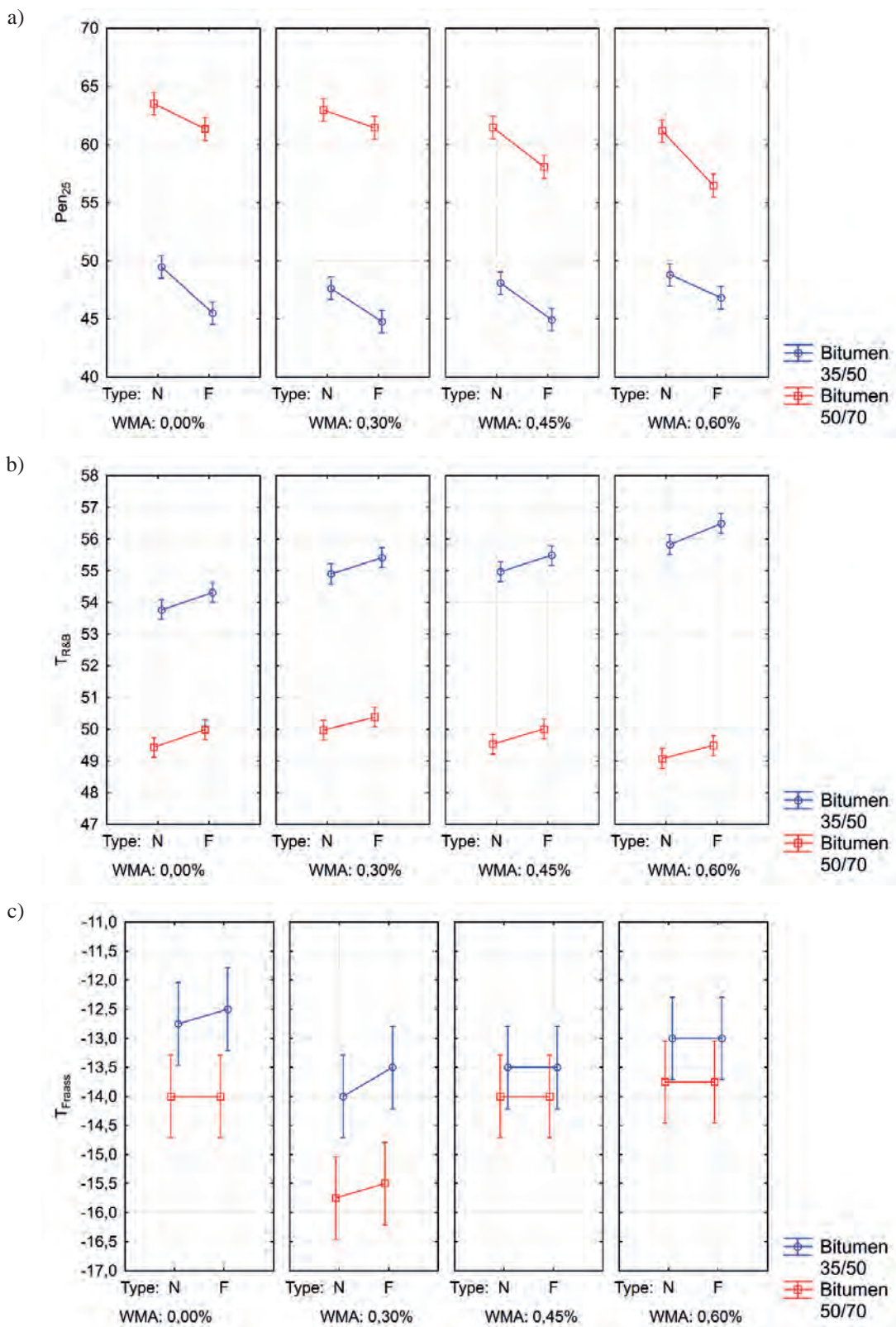


Fig. 2. Impact of the analysed factors (with/without additive, non-foamed/foamed) on the average values of parameters: a) Pen₂₅, b) T_{R&B}, c) T_{Fraass}. The error columns present 95% of the confidence interval

Rys. 2. Wpływ analizowanych czynników (bez/z dodatkiem, niespiany/spiany) na wartości średnie parametrów: a) Pen₂₅, b) T_{R&B}, c) T_{Fraass}. Słupki błędów prezentują 95-procentowe przedziały ufności

When analysing the results for bitumens not subjected to foaming, based on the 50/70 bitumen, it is possible to state that the use of the WMA additive resulted in a reduction in penetration from 63.5 (0.1 mm) for the base bitumen to 61.2 (0.1 mm) for asphalt with 0.60% additive. When comparing the results for the 35/50 bitumen, it is possible to state that the increase in the WMA additive content featured a reduction in penetration from 49.5 (0.1 mm) to 47.6 (0.1 mm) at the additive content of 0.30%, whereas further increase in its content caused an increase in Pen_{25} to 48.8 (0.1 mm) at the additive content of 0.60%.

Similar dependencies can be observed for asphalts subjected to foaming. In this case, the observations featured a noticeable reduction in penetration of all bitumens, which indicated the stiffening of foamed bitumens. However, taking into consideration the adopted sample preparation procedure, it is difficult to clearly determine which of the factors contributed mostly to the change in the penetration value: the foaming process or the sample heating process aimed at removing the foaming water remains.

Another analysed asphalt property was the softening point, which plays a significant role in bitumen classification and evaluation of pavement resistance to permanent deformation. When analysing the results of softening point designations, it was ascertained that adding the WMA agent to the 35/50 asphalt caused a slight increase in the softening point from 53.8°C for the base bitumen to 55.8°C at WMA additive content of 0.60%. The difference in extreme measurements amounted to 2°C. A different dependence was observed in the case of bitumen with penetration of 50/70. The WMA additive caused a slight increase in the softening point at the lowest dosage level, i.e. 0.30%. However, a reduction in the softening point was observed at increased dosage of 0.45% and 0.60%. The difference between the extreme results amounted to 0.9°C.

In the case of bitumens subjected to foaming featured a similar tendency to standard asphalts. The 35/50 asphalt demonstrated an increase in softening point along with the increase in the WMA additive content and the highest softening point was observed with the WMA additive content of 0.60% and the increase amounted to 2.20°C. In the case of the 50/70 asphalt, the increase in softening point occurred again with the WMA additive content of 0.30% to 50.4°C, and then a reduction when the dosage was increased. The use of the additive content of 0.60%

Analizując wyniki lepiszczy niepoddanych procesowi spieniania na bazie asfaltu 50/70, stwierdzić można, że zastosowanie dodatku WMA spowodowało zmniejszenie wartości penetracji z 63,5 (0,1 mm) dla lepiszcza bazowego do 61,2 (0,1 mm) dla asfaltu z 0,60% dodatku. Porównując wyniki dla asfaltu 35/50, można stwierdzić, że wraz ze wzrostem ilości dodatku WMA początkowo wartość penetracji zmniejszyła się z 49,5 (0,1 mm) do 47,6 (0,1 mm) przy ilości dodatku równej 0,30%, natomiast dalsze zwiększenie jego ilości spowodowało wzrost wartości cechy Pen_{25} do 48,8 (0,1 mm) przy zawartości 0,60% dodatku.

Podobne zależności można zaobserwować dla asfaltów poddanych procesowi spieniania. W tym przypadku zaobserwowano zauważalny spadek wartości penetracji wszystkich lepiszczy asfaltowych będący oznaką usztywnienia lepiszczy spienionych. Mając jednak na uwadze przyjętą procedurę przygotowywania próbek, trudno jest jednoznacznie określić, który z czynników miał przeważający wpływ na zmianę wartości penetracji: proces spieniania czy proces wygrzewania próbek w celu usunięcia pozostałości wody spieniającej.

Kolejną analizowaną własnością była temperatura mięknięcia, która odgrywa istotną rolę w klasyfikacji lepiszczy i ocenie odporności na deformacje trwałe nawierzchni. Analizując wyniki oznaczeń temperatury mięknięcia, stwierdzono, że dodanie środka WMA do asfaltu 35/50 spowodowało nieznaczny wzrost temperatury mięknięcia z wartości 53,8°C dla lepiszcza bazowego do 55,8°C przy jego zawartości 0,60%. Różnica skrajnych pomiarów wyniosła 2°C. W przypadku lepiszcza asfaltowego o penetracji 50/70 zaobserwowano odmienną zależność. Dodatek WMA spowodował nieznaczny wzrost temperatury w najniższym poziomie dozowania, tj. 0,30%. Jednak przy zwiększeniu dozowania do 0,45% i 0,60% zaobserwowano spadek temperatury mięknięcia. Zróżnicowanie dwóch skrajnych wyników wyniosło jedynie 0,9°C.

W przypadku lepiszczy poddanych spienianiu została zaobserwowana podobna tendencja co w przypadku asfaltów zwykłych. Asfalt 35/50 wykazywał wzrost temperatury mięknięcia wraz ze wzrostem dozowania dodatku WMA, największą temperaturę mięknięcia zaobserwowano przy jego zastosowaniu w ilości 0,60%, a wzrost ten wyniósł 2,20°C. W przypadku asfaltu 50/70 ponownie wystąpił wzrost temperatury mięknięcia przy dozowaniu dodatku WMA w ilości 0,30% do wartości 50,4°C, a następnie spadek przy zwiększeniu jego dozowania. Zastosowanie dodatku w ilości 0,60% spowodowało obniżenie tem-

caused a reduction in softening point by 0.50°C in comparison to asphalt without additive.

The Fraass breaking point prior to and after foaming was designated to determine the WMA additive's and foaming process' impact on the low-temperature properties of bitumens. In each case, asphalt with 35/50 penetration was characterised by higher breaking point than the 50/70 asphalt. In the case of both bitumens, a slight positive impact of using the WMA additive content of 0.3% was observed, resulting in a reduction in the breaking point by 1.75°C and 1.25°C respectively for the 35/50 asphalt and 1.75°C for the 50/70 bitumen. The increase in WMA additive content in the case of both bitumens resulted in an increase in breaking point to values similar to the values of base bitumens.

As for foamed bitumens, a similar tendency was observed as in the case of non-foamed asphalts. For each of the applied additive quantities, the 50/70 asphalt demonstrated a lower breaking point than 35/50 asphalt. Similarly to the previous case, a slight positive impact of using the WMA additive content of 0.3% was observed, resulting in a reduction in the breaking point by 1.0°C and 1.5°C respectively for the 50/70 and 35/50 asphalt in comparison to asphalt without additives. The increase in WMA additive content above 0.3% caused an increase in the breaking point to base values in both cases. Taking into consideration the narrow range of changes in the Fraass breaking point caused by the use of the WMA additive, the positive effect of its use must be deemed in the analysed case as confirmed, however irrelevant.

Another aspect of deliberations concerned the significance of the differences between the average values of the analysed independent variables (Pen_{25} , $T_{\text{R\&B}}$, T_{Fraass}) in four unrelated groups (WMA: 0.00%, 0.30%, 0.45%, 0.60%) for both base bitumens, i.e. 35/50 and 50/70 depending on the levels of the independent variables (type of bitumen, WMA additive content and bitumen foaming). Due to the conformity of the variables' distribution with the standard distribution and meeting the assumption of variance uniformity, it was possible to use the F (Fisher-Snedecor) parametric test that enables comparing several average values simultaneously. Table 1 presents the results of a multi-dimensional analysis of variance.

peratury mięknienia o $0,50^{\circ}\text{C}$ w porównaniu z asfaltem bez dodatku.

Do określenia wpływu dodatku WMA oraz procesu spieniania na właściwości niskotemperaturowe lepiszczy asfaltowych wykonano oznaczenia temperatury łamliwości Fraassa przed i po procesie spieniania. W każdym przypadku asfalt o penetracji 35/50 charakteryzował się wyższą temperaturą łamliwości niż asfalt 50/70. W przypadku obu lepiszczy asfaltowych zaobserwowano niewielki pozytywny wpływ zastosowania dodatku WMA w ilości 0,3%, skutkujący spadkiem temperatury łamliwości odpowiednio o $1,75^{\circ}\text{C}$ i $1,25^{\circ}\text{C}$ dla asfaltu 35/50 i $1,75^{\circ}\text{C}$ dla lepiszcza 50/70. Zwiększenie dozowania dodatku WMA w przypadku obu lepiszczy skutkowało wzrostem temperatury łamliwości do wartości bliskich wartościom charakteryzującym lepiszcza bazowe.

W przypadku lepiszczy spienionych zaobserwowano podobną tendencję jak w przypadku asfaltów niepoddanych procesowi spieniania. Dla każdej ze stosowanych ilości dodatku asfalt 50/70 wykazywał niższą temperaturą łamliwości niż asfalt 35/50. Podobnie jak w poprzednim przypadku zaobserwowano niewielki pozytywny wpływ zastosowania dodatku WMA w ilości 0,3% skutkujący spadkiem temperatury łamliwości odpowiednio o $1,0^{\circ}\text{C}$ i $1,5^{\circ}\text{C}$ dla asfaltu 50/70 i 35/50 w porównaniu z asfaltem bez dodatków. Zwiększenie ilości dodatku WMA z zawartości powyżej 0,3% spowodowało podwyższenie temperatury łamliwości do wartości bazowych w obu przypadkach. Biorąc pod uwagę niewielki zakres zmian temperatury łamliwości Fraassa, spowodowany zastosowaniem dodatku WMA, pozytywny efekt jego zastosowania należy uznać w analizowanym przypadku za potwierdzony, jednak mało znaczący.

Kolejnym elementem rozważań było wnioskowanie o istotności różnic między średnimi wartościami rozpatrywanych zmiennych niezależnych (Pen_{25} , $T_{\text{R\&B}}$, T_{Fraass}) w czterech niepowiązanych grupach (WMA: 0,00%, 0,30%, 0,45%, 0,60%) dla obu lepiszczy bazowych, tj. dla 35/50 i 50/70 w zależności od poziomów zmiennych niezależnych (rodzaju lepiszcza, ilości dodatku WMA i poddaniu lepiszcza procesowi spieniania). Z uwagi na zgodność rozkładu zmiennych z rozkładem normalnym oraz spełnienie założenia jednorodności wariancji możliwe było użycie testu parametrycznego F (Fisiera-Snedecora) pozwalającego na przeprowadzenie jednoczesnego porównania kilku średnich. W tabeli 1 zamieszczono wyniki wielowymiarowej analizy wariancji.

Table 1. Analysis of variance for the tested dependent variables: Pen_{25} , $T_{R\&B}$, T_{Fraass}
 Tabela 1. Analiza wariancji dla badanych zmiennych zależnych: Pen_{25} , $T_{R\&B}$, T_{Fraass}

| Effect | Degr. of Freedom | SS | MS | F | p |
|----------------------------------|------------------|----------|----------|----------|----------|
| Pen_{25} | | | | | |
| Intercept | 1 | 464887.5 | 464887.5 | 191391.0 | <0.001 |
| Bitumen | 1 | 7635.6 | 7635.6 | 3143.5 | <0.001 |
| Type | 1 | 353.1 | 353.1 | 145.4 | <0.001 |
| WMA | 3 | 8.1 | 28.4 | 11.7 | <0.001 |
| Bitumen*Type | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.939454 |
| Bitumen*WMA | 3 | 142.4 | 47.5 | 19.5 | <0.001 |
| Type*WMA | 3 | 8.3 | 2.8 | 1.1 | 0.335679 |
| Bitumen*Type*WMA | 3 | 30.5 | 10.2 | 4.2 | 0.007107 |
| Error | 144 | 349.8 | 2.4 | | |
| Total | 159 | 8604.8 | | | |
| $T_{R\&B}$ | | | | | |
| Intercept | 1 | 263974.6 | 263974.6 | 1761039 | <0.001 |
| Bitumen | 1 | 703.3 | 703.3 | 4692 | <0.001 |
| Type | 1 | 6.3 | 6.3 | 42 | <0.001 |
| WMA | 3 | 10.8 | 3.6 | 24 | <0.001 |
| Bitumen*Type | 1 | 0.1 | 0.1 | 0 | 0.546025 |
| Bitumen*WMA | 3 | 21.0 | 7.0 | 47 | <0.001 |
| Type*WMA | 3 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0.978674 |
| Bitumen*Type*WMA | 3 | 0.1 | 0.0 | 0 | 0.940219 |
| Error | 80 | 12.0 | 0.1 | | |
| Total | 95 | 753.6 | | | |
| T_{Fraass} | | | | | |
| Intercept | 1 | 12155.06 | 12155.06 | 24310.13 | <0.001 |
| Bitumen | 1 | 20.25 | 20.25 | 40.50 | <0.001 |
| Type | 1 | 0.25 | 0.25 | 0.50 | 0.482919 |
| WMA | 3 | 19.31 | 6.44 | 12.88 | <0.001 |
| Bitumen*Type | 1 | 0.06 | 0.06 | 0.12 | 0.725222 |
| Bitumen*WMA | 3 | 4.62 | 1.54 | 3.08 | 0.035995 |
| Type*WMA | 3 | 0.38 | 0.13 | 0.25 | 0.860939 |
| Bitumen*Type*WMA | 3 | 0.06 | 0.02 | 0.04 | 0.988528 |
| Error | 48 | 24.00 | 0.50 | | |
| Total | 63 | 68.94 | | | |

The analysis of variance demonstrated a significance of impact of the type of base bitumen, foaming process and WMA additive content on the penetration designations at 25°C and softening point. Furthermore, a statistical significance of the interaction between the type of bitumen and WMA additive content as well as of the interaction between all three tested factors was demonstrated, which indicates that they had a substantial impact on the value of the Pen_{25} dependent variable. On the other hand, in the case of the $T_{R\&B}$

Analiza wariancji wykazała istotność wpływu rodzaju bazowego lepiszcza asfaltowego, procesu spieniania oraz ilości dozowanego dodatku WMA na wartości oznaczeń penetracji w 25°C oraz temperatury mięknięcia. Wykazano ponadto istotność statystyczną interakcji rodzaju lepiszcza asfaltowego i ilości dodatku WMA oraz interakcji pomiędzy wszystkimi trzema badanymi czynnikami, co wskazuje że miały one istotny wpływ na kształtowanie wartości zmiennej zależnej Pen_{25} . Natomiast dla cechy $T_{R\&B}$

feature, aside from the significance of all main effects (type of bitumen, WMA additive content, foaming), the significance of impact of the interaction between the type of asphalt and WMA additive content on the designated dependent variable was demonstrated. In the case of the breaking point, the achieved p-value is smaller than the assumed significance of 0.05 for the bitumen and WMA factors as well as their interactions, which indicates a significance of the impact of the type of bitumen and the WMA additive content. At the same time, the significance of impact of the foaming process or the interaction between other independent variable combinations on the T_{Fraass} dependent variable was not confirmed.

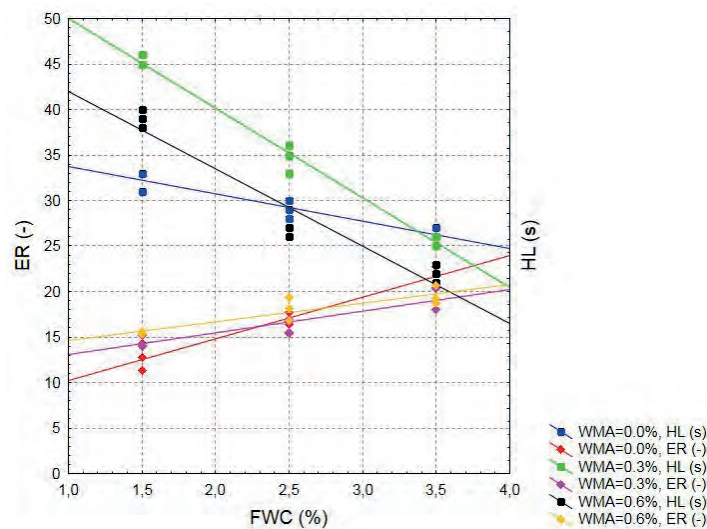
3.2. Physical parameters of foamed bitumens

The foaming process featured a measurement of two physical parameters of the asphalt foam: the ER expansion ratio and the HL half-life according to [10]. The results of testing the foaming features of the tested bitumens are presented in Figures 3 and 4, respectively for 35/50 and 50/70. During the testing, the WMA additive content for the 35/50 and 50/70 asphalts was reduced from 0.15% to 0.30%.

poza istotnością wszystkich efektów głównych (rodzaj lepiszcza, ilość dodatku WMA, spienianie) wykazano istotność wpływu interakcji rodzaju asfaltu oraz ilości dozowania dodatku WMA na oznaczone wartości zmiennej zależnej. W przypadku temperatury łamliwości uzyskana wartość p-value jest mniejsza od założonego poziomu istotności równego 0,05 dla czynników bitumen i WMA, jak również ich interakcji, co wskazuje na istotność wpływu rodzaju asfaltu bazowego oraz ilości dozowania dodatku WMA. Nie potwierdzono jednocześnie istotności wpływu procesu spieniania ani interakcji pozostałych kombinacji ocenianych zmiennych niezależnych na wartość zmiennej zależnej T_{Fraass} .

3.2. Właściwości fizyczne piany asfaltowej

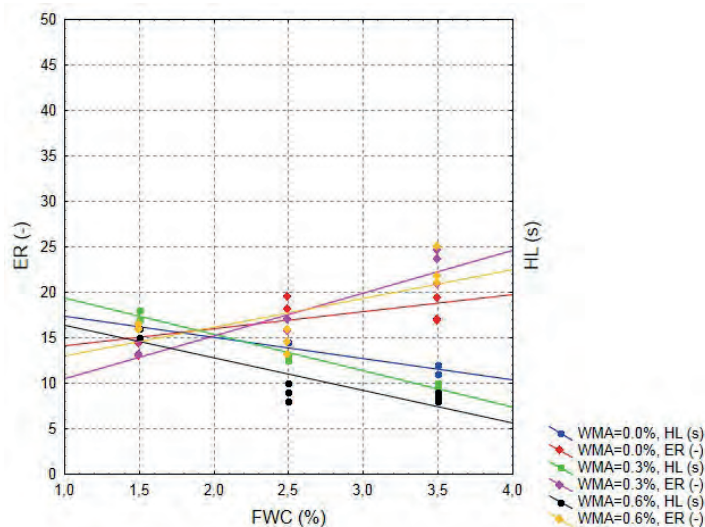
Podczas procesu spieniania dokonano pomiaru dwóch parametrów fizycznych piany asfaltowej: wskaźnik ekspansji ER oraz czas połowicznego rozpadu HL zgodnie z [10]. Wyniki badań charakterystyk spieniania badanych lepiszczy asfaltowych przedstawiono na rysunkach 3 i 4, odpowiednio dla 35/50 i 50/70. Na tym etapie prac badawczych krok dozowania dodatku WMA względem asfaltów 35/50 i 50/70 został zmniejszony z 0,15% do 0,30%.



| Parameter | WMA = 0.0% | | WMA = 0.3% | | WMA = 0.6% | |
|-----------|------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|
| | Function | Pearson (r) | Function | Pearson (r) | Function | Pearson (r) |
| ER (-) | $y = 5.633 + 4.582 \cdot x$ | 0.9546 | $y = 10.707 + 2.379 \cdot x$ | 0.9321 | $y = 12.546 + 2.055 \cdot x$ | 0.8948 |
| HL (s) | $y = 36.722 - 3.000 \cdot x$ | -0.9522 | $y = 59.806 - 9.833 \cdot x$ | -0.9937 | $y = 50.472 - 8.500 \cdot x$ | -0.9629 |

$x = FWC, y = ER \text{ or } HL$

Fig. 3. Dependency of ER and HL on the dosage of foaming water for 35/50 with and without variable WMA additive content
Rys. 3. Zależność ER oraz HL od poziomu dozowania wody spieniającej dla 35/50 bez i ze zmienną ilością dodatku WMA



| Parameter | WMA = 0.0% | | WMA = 0.3% | | WMA = 0.6% | |
|-----------|------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|
| | Function | Pearson (r) | Function | Pearson (r) | Function | Pearson (r) |
| ER (-) | $y = 12.189 + 1.895 \cdot x$ | 0.6658 | $y = 5.782 + 4.720 \cdot x$ | 0.9355 | $y = 9.759 + 3.201 \cdot x$ | 0.7120 |
| HL (s) | $y = 19.667 - 2.333 \cdot x$ | -0.9272 | $y = 23.389 - 4.000 \cdot x$ | -0.9878 | $y = 20.014 - 3.583 \cdot x$ | -0.8812 |

x = FWC, y = ER or HL

Fig. 4. Dependency of ER and HL on the dosage of foaming water for 50/70 with and without variable WMA additive content
Rys. 4. Zależność ER oraz HL od poziomu dozowania wody spieniającej dla 50/70 bez i ze zmienną ilością dodatku WMA

Based on the obtained dependencies of the expansion ratio and half-life on the foaming water content (Figs. 3, 4), it is possible to designate a foaming water content that allows for obtaining similar values of both of these features, i.e. optimal foaming water content at the intersection of the expansion ratio and half-life curves. It can be noted that for the 35/50 bitumens with and without a variable WMA additive content, the optimal foaming water content amounted to 3.5%, whereas for softer bitumens, based on the 50/70 asphalt – it was 2.0%. This dependency corresponds to those achieved for asphalts with other additives, including the Fischer-Tropsch synthetic wax [5, 10]. The foamed asphalt parameters obtained for the optimal FWC factor levels amounted to approx. ER = 18–22 and HL = 24–27 s as well as ER = 15–17 and HL = 13–16 s respectively for bitumens made from 35/50 and 50/70 asphalts. For bitumens based on the 35/50 asphalt, across the full range of the WMA additive content, these are satisfactory results (ER > 17 and HL > 13 s acc. to [11]) in terms of using them for manufacturing mixes in lowered process temperatures.

A model in the form of a second degree multinomial was adopted for the evaluation of the impact of changes in the tested factors (FWC, WMA) on the properties of bitumens.

Na podstawie uzyskanych zależności wskaźnika ekspansji i czasu połowicznego rozpadu od ilości wody spieniającej (rys. 3, 4) wyznaczyć można taką zawartość wody spieniającej, przy której uzyskuje się zbliżone wartości obu tych cech, czyli optymalną ilość wody spieniającej na przecięciu się krzywych ekspansji oraz czasu półtrwania. Zauważyć można, że dla lepszycy 35/50 bez i ze zmienną ilością dodatku WMA optymalna zawartość wody spieniającej wyniosła 3,5%, natomiast dla lepszycy bardziej miękkich na bazie asfaltu 50/70 wyniosła 2,0%. Zależność ta jest zgodna z tymi, które uzyskiwano dla asfaltów z innymi dodatkami, w tym z woskiem syntetycznym Fischera-Tropscha [5, 10]. Uzyskane dla tych optymalnych poziomów czynnika FWC parametry asfaltów spienionych wyniosły od około ER = 18–22 i HL = 24–27 s oraz ER = 15–17 i HL = 13–16 s odpowiednio dla lepszycy wytworzonych z asfaltu 35/50 oraz 50/70. Dla lepszycy na bazie asfaltu 35/50, w pełnym zakresie dozowania dodatku WMA, są to wartości zadowalające (ER > 17 i HL > 13 s wg [11]) z punktu widzenia przeznaczenia ich do wytwarzania mieszanek w obniżonych temperaturach technologicznych.

Do oceny wpływu zmian poziomu badanych czynników (FWC, WMA) na właściwości lepszycy asfaltowych przyjęto model w postaci wielomianu stopnia drugiego.

The graphical interpretation of the surface responses to changes in the expansion ratio and half-life depending on the WMA additive content and the foaming water content for the tested bitumens is presented in Figure 5a–5d.

Graficzną interpretację powierzchni odpowiedzi zmian wskaźnika ekspansji oraz okresu półtrwania w zależności od ilości dodatku WMA oraz zawartości wody spieniającej dla badanych lepiszczy przedstawiono na rysunku 5a–5d.

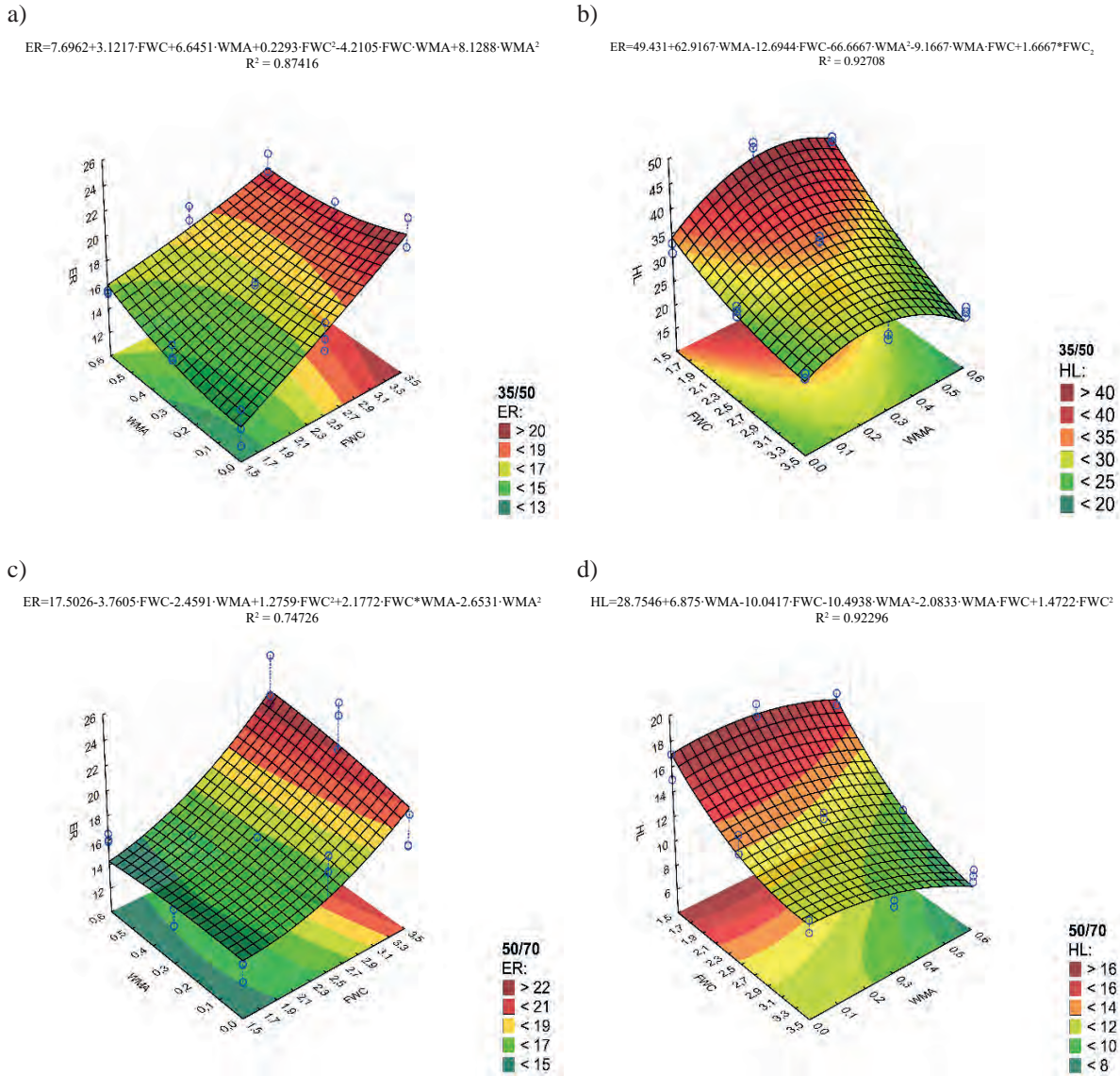


Fig. 5. Impact of the changes in the WMA and FWC factor levels on the parameters (ER, HL) of asphalt foam manufactured from the 35/50 (a–b) and 50/70 (c–d) bitumen

Rys. 5. Wpływ zmiany poziomu czynnika WMA oraz FWC na parametry (ER, HL) piany asfaltowej wyprodukowanej z lepiszcza 35/50 (a–b) oraz 50/70 (c–d)

The presented results suggest that the foaming water content during the foaming process as well as the change in the WMA additive content in both base bitumens had a substantial impact on the HL dependent variable. The increase in the additive and foaming water content caused an accelerated decay of the asphalt foam. On the other hand, in the case of the ER feature, the above analysis does not

Przedstawione wyniki sugerują, że ilość dozowanej wody spieniającej podczas procesu spieniania, jak również zmiana zawartości dodatku WMA do obu lepiszczy bazowych miały istotny wpływ na zmienną zależną HL. Zwiększanie zawartości dodatku jak również ilości wody spieniającej powodowało przyspieszenie rozpadu piany asfaltowej. Natomiast w przypadku cechy ER powyższa

confirm the significance of the impact of the WMA additive content.

4. CONCLUSIONS

Based on the analysis of the test results, it is possible to formulate the following conclusions:

- the use of the WMA additive had statistically important impact on the values of penetration, softening point and breaking point of the tested binders;
- the evaluation of the aforementioned dependent variables concluded no interactions between the impact of the foaming process and the type of bitumen and WMA additive;
- the foaming process had substantial impact on the penetration of the tested bitumens with the WMA additive lowering the asphalt mix manufacturing temperature;
- in each of the described cases, the use of the WMA additive had a statistically substantial impact on the penetration reduction in relation to the 50/70 and 35/50 base asphalts with simultaneous increase in softening point for the non-foamed and foamed 35/50 asphalt;
- the additive used in the testing had a statistically substantial, positive impact on the reduction of the Fraass breaking point in both foamed and non-foamed asphalt, however the degree of changes (max 1.75°C) made the effect to have a limited relevance;
- bitumens made from the 35/50 asphalt were characterised by more favourable foaming parameters in comparison to the 50/70 asphalt in the full range of the WMA additive dosage;
- the foaming process had a statistically substantial impact on the penetration, softening point and breaking point of the tested bitumens, however the differences between the foamed bitumens and base bitumens in terms of the softening point did not exceed 1°C and as for the breaking point –0.5°C;
- a statistically important impact of the change in the WMA additive and foaming water content on the ER parameter was observed for both bitumen groups, whereas the change had no major impact on the asphalt foam's half-life.

analiza nie potwierdza istotności wpływu ilości środka WMA.

4. WNIOSKI

Na podstawie analizy wyników badań można sformułować następujące wnioski:

- zastosowanie dodatku WMA miało istotny statystycznie wpływ na wartości penetracji, temperatur mięknięcia oraz temperatur łamliwości;
- w ocenie powyższych zmiennych zależnych nie zaobserwowano interakcji między wpływem procesu spieniania a rodzajem lepiszcza asfaltowego oraz dodatkiem WMA;
- proces spieniania miał istotny wpływ na wartości penetracji badanych lepiszczy asfaltowych bazowych oraz z dodatkiem środka WMA obniżającego temperaturę produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej;
- w każdym z opisanych przypadków zastosowanie dodatku WMA miało istotny statystycznie wpływ na zmniejszenie penetracji w stosunku do asfaltów bazowych 50/70 i 35/50 przy równoczesnym wzroście temperatury mięknięcia dla asfaltu 35/50 niespionego i po spienieniu wodą;
- dodatek stosowany w badaniach wpływa w sposób statystycznie istotny pozytywnie na obniżenie temperatury łamliwości według Fraassa, zarówno w asfalcie niespionym, jak i spionym, jednak wielkość tych zmian (maksymalnie o 1,75°C) sprawia, że jest to efekt o ograniczonym znaczeniu;
- korzystniejszymi parametrami spieniania charakteryzowały się lepiszcza wytworzone z asfaltu 35/50 w stosunku do 50/70, w pełnym zakresie dozowania dodatku WMA;
- proces spieniania miał istotny statystycznie wpływ na wartości penetracji, temperatury mięknięcia oraz temperatury łamliwości badanych lepiszczy asfaltowych, jednakże różnice między lepiszczami poddanymi procesowi spieniania oraz lepiszczami bazowymi w przypadku temperatury mięknięcia nie przekraczały 1°C, a w przypadku temperatury łamliwości 0,5°C;
- zanotowano istotny statystycznie wpływ zmiany ilości dodatku WMA oraz wody spieniającej na parametr ER dla obu grup lepiszczy asfaltowych, natomiast zmiana poziomu wspomnianych czynników nie wpłynęła znacząco na okresy półtrwania piany asfaltowej.

REFERENCES

- [1] Remisova E., Zatkalikova V., Schlosser F., *Study of rheological properties of bituminous binders in middle and high temperatures*, "Civil and Environmental Engineering" 2016, Vol. 12, Issue 1, pp. 13–20, DOI: 10.1515/cee-2016-0002.
- [2] Remisova E., Zatkalikova V., Schlosser F., *Evaluation of bituminous binder in relations to permanent deformation*, XXV Polish-Russian-Slovak Seminar – Theoretical Foundation of Civil Engineering, "Procedia Engineering" 2016, Vol. 153, pp. 584–589, DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.196.
- [3] Mieczkowski P., *The effect of an organometallic catalyst on the properties of pen grade bitumens*, "Structure and Environment" 2018, 4, Vol. 10, pp. 338–353, DOI: 10.30540/sae-2018-031.
- [4] Gawel J., Kalabińska M., Piłat J., *Asfalty drogowe*, WKiŁ, Warszawa 2001.
- [5] Chomicz-Kowalska A., Mrugała J., Maciejewski K., *Evaluation of foaming performance of bitumens modified with the addition of surface active agent*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2017, Vol. 245, 1–10.
- [6] Gallelli V., Iuele T., Vaiana R., *Warm MiX Bitumen with Synthetic Zeolite: a Laboratory Study on Mixes Workability*, "International Journal of Pavement Research and Technology" 2013, Chinese Society of Pavement Research and Engineering, No. 5, Vol. 6, pp. 562–569.
- [7] <<https://www.akzonobel.com>>.
- [8] Judycki J., Stienss M., *Badania mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze otaczania – raport końcowy*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2011.
- [9] Franus W., Woszek A., Bandura L., Zofka A., *Właściwości zeolitu naturalnego i syntetycznego oraz ich wpływ na efekt spienienia asfaltu*, „Materiały Budowlane” 2017, nr 8, s. 60–64.
- [10] Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Maciejewski K., *Application of synthetic wax for improvement of foamed bitumen parameters*, "Construction and Building Materials" 2015, Vol. 83, pp. 62–69, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.060.
- [11] Jenkins K.J., *Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen*, University of Stellenbosch, 2000.

Acknowledgments:

The work is supported by the program of the Minister of Science and Higher Education under the name: Regional Initiative of Excellence in 2019–2022 project number 025/RID/2018/19 financing amount PLN 12.000.000.

Podziękowania:

Projekt finansowany w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą Regionalna Inicjatywa Doskonalości w latach 2019–2022, nr projektu 25/RID/2018/19, kwota finansowania 12 000 000 zł.

