

Wpływ wapna hydratyzowanego na właściwości reologiczne lepiszcza odzyskanego z asfaltowej mieszanki mastyksowo-grysowej

The effect of hydrated lime on the rheological properties of extracted bitumen from Stone Mastic Asphalt

1. Wprowadzenie

Wapno jest od dawna stosowane jako materiał budowlany do wytwarzania różnego rodzaju produktów. W drogownictwie przede wszystkim wykorzystuje się wapno hydratyzowane i palone miedone do stabilizacji gruntów spoistych.

Interesującym kierunkiem badań jest zastosowanie wapna hydratyzowanego w technologii mieszanek mineralno-asfaltowych, do wykonywania warstw konstrukcyjnych nawierzchni drogowych. Wapno hydratyzowane dzięki zasadowemu odczynowi ma duży wpływ na właściwości asfaltu (1, 2) i na poprawę jego adhezji do kruszywa o dużej zawartości krzemionki (3-5). Spełnia ono również rolę antyutleniaacza asfaltu, w wyniku czego następuje spowolnienie procesu starzenia i tym samym spowolnienie utraty jego lepko-sprężystych właściwości (6). Wykonywane dotychczas badania stosowania wapna hydratyzowanego były prowadzone w laboratorium, w których naśladowano warunki rzeczywiste (7-9). W związku z tym, nie są one w pełni reprezentatywne dla asfaltowych nawierzchni drogowych ze względu na złożony wpływ klimatu oraz różnorodność obciążenia nawierzchni ruchem pojazdów, w warunkach rzeczywistych na drodze. Jednocześnie bardzo mała ilość zastosowań na świecie, obejmujących konstrukcje nawierzchni z mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem wapna hydratyzowanego oraz ograniczony okres ich obserwacji (kilka lat), nie pozwoliły zgromadzić odpowiednich danych związanych z jego wpływem na lepiszcze oraz nawierzchnię drogi. Należy zaznaczyć, że warstwa ścieralna konstrukcji nawierzchni drogi wykonana z mieszanki mineralno-asfaltowej [betonu asfaltowego lub mieszanki mastyksowo-grysowej (MMG)] powinna zachować trwałość przez co najmniej 10 lat (10). W związku z tym, o poprawności rozwiązań laboratoryjnych decyduje ich weryfikacja w warunkach rzeczywistych na drodze, w czasie eksploatacji nawierzchni w okresie nie krótszym niż 10 lat. Niestety takie dane są praktycznie niedostępne. Było to jedną z głównych przyczyn nie stosowania wapna hydratyzowanego do produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych.

1. Introduction

Hydrated lime has been used as building materials for production of various kinds of products, since many years. In the road sector the hydrated lime and the burnt lime for a soil treatment technology, are mainly used.

An interesting trend of research is the use of the hydrated lime in the technology of asphalt mixtures designated for construction of road pavements. Due to the alkaline reaction the hydrated lime significantly improves the properties of asphalt mixes (1, 2) and is increasing its adhesion to aggregates with high silica content (3-5). It also plays a role as an bitumen antioxidant causing the decrease of ageing thereby slowing down the loss of its viscoelastic properties (6). The tests of the hydrated lime use in asphalt technology were primarily conducted in laboratory scale, only simulating the field conditions (7-9). However, they are not fully representative for asphalt road pavements, due to the complexity of climatic effects and the variability of traffic load transmitted to the asphalt pavements. Presently, there are a very low applications in the world of the hydrated lime additive to the asphalt pavement structures and the limited period up to few years only, of their examination. Thus it did not allowed to create the appropriate database related to the effects of the hydrated lime on the bituminous binder and road pavement. It is obvious that the abrasive layer of the asphalt pavements or of Stone Mastic Asphalt (SMA) should be durable for at least 10 years (10). Therefore, the effectiveness of laboratory simulations need the verifications in real field conditions on the road, during not less than 10 years operation. Unfortunately, such a database is practically unavailable. Therefore, it was one of the main reason of the lack of interest in the implementation of the hydrated lime in the production of bituminous mixes.

In 1999, during the road rebuilding and modernization, a SMA wearing coarse layer with hydrated lime (HL) was placed in one of the main streets in Kielce, Poland. The SMA mixture contained 6.2% of D70 bitumen (currently 50/70) and 4% SBS polymer, known as Kraton 1101 CM. Hydrated lime was added to the SMA mixture,

W 1999 roku w czasie modernizacji jednej z głównych ulic w Kielcach wykonana została warstwa ścieralna nawierzchni z asfaltowej mieszanki mastyksowo-grysowej z dodatkiem wapna hydratyzowanego (HL) oraz kontrolna zawierająca stosowaną zwykle domieszkę adhezyjną w postaci aminy tłuszczowej (A), w ilości 0,5% w stosunku do asfaltu (11). Nawierzchnia wykonana z asfaltowej mieszanki mastyksowo-grysowej obciążona była ruchem KR4. Zawierała ona 6,2% asfaltu D70 (obecnie 50/70) z dodatkiem 4 % polimeru SBS Kraton 1101 CM, którego ilość wyznaczono w procesie optymalizacji. Wapno hydratyzowane dodawano do mieszanki mastyksowo-grysowej, zastępując nim 30% wypełniacza wapiennego.

Program badawczy zakładał eksploatację nawierzchni przez co najmniej 10 lat. W tym czasie badano wpływ wapna hydratyzowanego na stan nawierzchni wykonanej z mieszanki mastyksowo-grysowej. Ważnym etapem prac było również badanie lepiszcza pobranego z tej mieszanki oraz jej właściwości.

2. Badania lepiszcza pobranego z mieszanki mastyksowo-grysowej z dodatkiem wapna hydratyzowanego, wbudowanej w nawierzchnię drogową

W ciągu 12 lat eksploatacji prowadzono stałą kontrolę nawierzchni z mieszanki mastyksowo-grysowej, zgodnie z wymaganiami Systemu Oceny Stanu Nawierzchni. Stwierdzono bardzo korzystny wpływ wapna hydratyzowanego na jej właściwości; powierzchnia nie wykazywała złuszczeń, ziaren kruszywa, ubytków mastyksu czy też uszkodzeń spowodowanych oddziaływaniem wody i mrozu (11). W 2011 roku zostały wykonane badania lepiszcza uzyskanego z próbek mieszanki mastyksowo-grysowej z dodatkiem wapna hydratyzowanego pobranego z nawierzchni oraz z mieszanki kontrolnej zawierającej aminę tłuszczową. Lepiszczce otrzymano w wyniku ekstrakcji próbek tych mieszanek pobranych z warstwy ścieralnej w miejscach wystąpienia kolein (RD) oraz z nawierzchni bez kolein (N). Miejsca pobrania próbek z nawierzchni wykonanej z mieszanki mastyksowo-grysowej wynikają ze specyfiki jej obciążenia ruchem pojazdów, szczególnie z oddziaływania opon samochodowych.

W badaniach wykorzystano tylko górną warstwę nawierzchni wykonanej z mieszanki mastyksowo-grysowej o grubości 2 cm, w której zawarte lepiszcze jest poddawane oddziaływaniu czynników klimatycznych. Wykorzystując lepiszcze odzyskane z takiej nawierzchni po 12 latach eksploatacji zbadano jego właściwości reologiczne, które mają duży wpływ na trwałość tej nawierzchni.

2.1. Lepkość dynamiczna oraz lepkość zerowego ścinania lepiszcza w temperaturze 60°C

Lepkość dynamiczna wyraża tarcie wewnętrzne związane z siłami kohezji w materiale i określa opór występujący przy przesuwaniu jednej warstwy asfaltu względem drugiej (12). Pomiary wykonywano lepkościomierzem „Rheotest 2” o cylindrach współosiowych,

replacing 30% of the filler mass. Two parameters were controlled: the contents of the SBS polymer and of the hydrated lime, which addition was experimentally optimized. The reference SMA layer with the fatty amine addition (A) of 0.5% by mass of the bitumen was also used in reference pavement (11).

As a test period the 10 years pavement exploitation was adopted. During this period the hydrated lime influence on the bitumen properties were collected as a database. Lime influence on the bitumen properties was examined. An important point of research was also the examination of the bitumen binder tests, extracted from the SMA pavement, sampled from the road.

2. Test results of the bitumen extracted from SMA sample

Within 12 years of exploitation the SMA pavement was continuously monitored in accordance with the requirements of SOSN. The very advantageous effect of the hydrated lime addition on the SMA surface properties was confirmed. There were no raveling, stripping and defects caused by the action of water and frost (11). In 2011, the extracted binder from the samples of SMA mixtures with the hydrated lime addition and the reference with the fatty amine additive were examined. The samples of SMA mixture were taken from the wearing course surface layer in the wheel path (RD) and from the surface out of rut (N). Sampling places of SMA samples were connected with the traffic load features.

In the study the samples only of the 2 cm top surface layer of SMA were used, in which the binder suffered a negative influences of climatic factors. The rheological properties of the binder, extracted from the samples taken from the surface layer of SMA pavement after 12 years of exploitation, were tested.

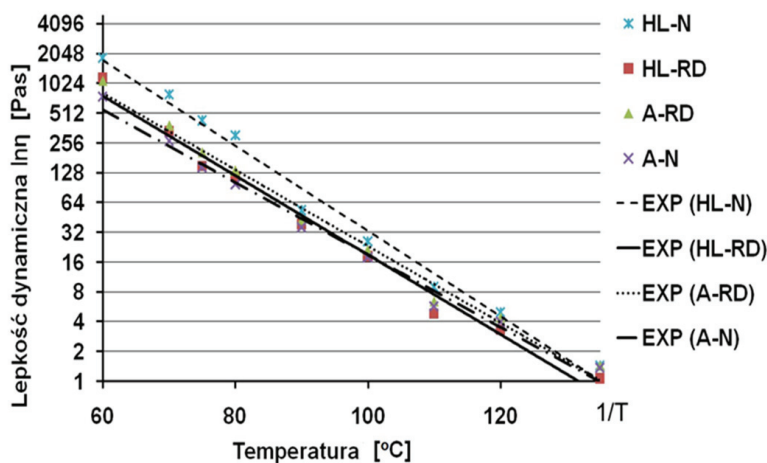
2.1. Dynamic viscosity and zero shear viscosity of the bitumen at 60°C

Dynamic viscosity is directly linked with the cohesion forces and is determining the bitumen layers friction during their shearing (12). For the measurements the co-axial viscometer “Rheotest 2” with a cylinders mark H2 was used. All bitumen viscosity tests were performed at a shear rate of 1 s⁻¹. The results of dynamic viscosity tests at temperatures range from 60°C to 135°C are presented in Fig. 1.

The proportional increase of the dynamic viscosity of the bitumen samples with the hydrated lime addition with respect to the amine modified bitumen was found and was connected with the bitumen ageing process. Conversion reactions of bitumen components and the expansion of asphaltene micelles lead to the increase in molecular mass of the bitumen. Thus, it causes a drop in bitumen elasticity.

The variation of the dynamic viscosity as a function of temperature can be described by exponential formula:

$$\eta = a \cdot e^{b \cdot T} \quad [1]$$



Rys. 1. Lepkość dynamiczna lepiszcza uzyskanego z mieszanki mastykowo-grysowej w funkcji temperatury;

HL-N – lepiszcze z mieszanki zawierającej wapno, pobranej z nawierzchni poza koleiną,

HL-RD – lepiszcze z mieszanki zawierającej wapno, pobranej z koleiny w nawierzchni, A-N – lepiszcze z mieszanki zawierającej aminę tłuszczową, pobranej z nawierzchni poza koleiną,

A-RD – lepiszcze z mieszanki zawierającej aminę tłuszczową, pobranej z koleiny w nawierzchni

Fig. 1. The dynamic viscosity of the extracted bitumen from SMA versus temperature; HL N – binder extracted from the mixture sample with hydrated lime, taken from the pavement surface out of the rut,

HL-RD – binder extracted from the mixture sample with hydrated lime, taken from the pavement surface in the rut,

A-N – binder extracted from mixture with the fatty amine additive, taken from the surface out of the rut,

A-RD – binder extracted from mixture with the fatty amine additive, taken from the pavement surface in the rut

typu H2. Lepkości asfaltów zmierzono przy stałej szybkości ścinania wynoszącej 1 s^{-1} . Wyniki badań lepkości dynamicznej lepiszcza z nawierzchni mastykowo-grysowej w przedziale temperatur $60^\circ\text{C} - 135^\circ\text{C}$ przedstawiono na rysunku 1.

Stwierdzony proporcjonalny wzrost lepkości dynamicznej próbek asfaltu z dodatkiem wapna hydratyzowanego w stosunku do próbek asfaltu z aminami tłuszczowymi jest związany z procesem starzenia asfaltów. Reakcje konwersji cząstek asfaltu, powiększenie się micel asfaltenowych powodują wzrost masy cząsteczkowej asfaltu. Tym samym zmniejsza się sprężystość asfaltu.

Przebieg zmian lepkości w funkcji temperatury można opisać funkcją wykładniczą

$$\eta = a \cdot e^{b \cdot T} \quad [1]$$

gdzie: η – lepkość dynamiczna (Pa·s), a , b – stałe (wyznaczone doświadczalnie), T – temperatura ($^\circ\text{C}$). Estymację parametrów regresji w postaci funkcji wykładniczej zebrano w tablicy 1.

Lepkość dynamiczna lepiszcza, uzyskanego z mieszanki mastykowo-grysowej wbudowanej w nawierzchnię drogi w funkcji temperatury wskazują na znaczny jej wzrost w temperaturze wyższej od 90°C (rysunek 1). Jest to wynik wpływu wapna hydratyzowanego na asfalt oraz jego interakcji z fazą polimerową SBS.

where: η – dynamic viscosity (Pa·s), a , b – experimental coefficients, T – temperature ($^\circ\text{C}$).

The estimation of regression parameters from exponential function are presented in Table 1.

The dynamic viscosity of the binder extracted from the SMA sample shows it significant increase at temperature above 90°C (Fig. 1). It is caused by the structural changes in the bituminous binder with hydrated lime addition and its interaction with SBS polymer. The parameter a (Table 1) is highly related to the molecular mass of the bitumen and to its cohesion. The samples of binder extracted from the SMA samples out of the rut (RD) have the higher dynamic viscosity than the binder from SMA sampled from the rut path (N). It shows that the ageing process was quicker in this part of the pavement surface. Furthermore, the drop of dynamic viscosity rate (a slope of regression lines in the semi-logarithmic scale in Fig. 1) shows a strong stress in the bitumen flow with hydrated lime additive (HL) and its non-Newtonian behaviour as well. This result is confirmed by the properties of the surface pavement from SMA, in which no excessive plastic deformation was found.

An additional evaluation of the structural changes in the extracted bitumen with tested additives [the hydrated lime or fatty amine] are the zero shear viscosity test (ZSV). In these tests the static shear was used with the corresponding shear stress to maintain the LVE behaviour. The level of zero shear viscosity η_0 is directly linked with the shear rate of the bitumen at a given stress and is presented by the slope of the tangent to the angle deformation rate of bitumen at the steady flow, to the time axis. The growth of the ZSV reflects the increase of the bituminous binder elasticity (14). The measurements of ZSV was performed at a constant shear stress equal 25 Pa, during one hour. The zero shear viscosity was determined in accordance with CEN/TS 15325:2008 and the results are presented in Fig. 2.

It should be noted that the ZSV is higher for the extracted bitumen with the addition of hydrated lime in comparison to the fatty amine

Tablica 1 / Table 1

PARAMETRY DOPASOWANIA MODELU $\eta = f(T)$

THE PARAMETERS OF THE MODEL ESTIMATION: $\eta = f(T)$

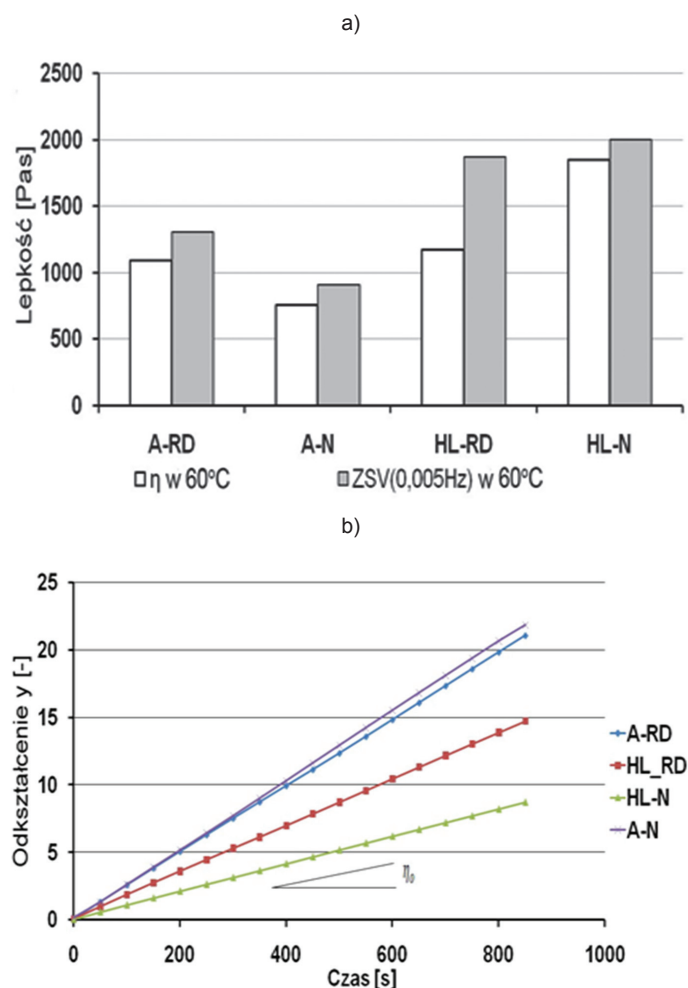
Rodzaj próbki* Designation samples	Stałe we wzorze [1] Model parameters [1]		Współczynnik determinacji Determination coefficient
	a	b	
HL-N	67003	-0,09	0,98
HL-RD	20028	-0,09	0,88
A-RD	17387	-0,08	0,98
A-N	88224	-0,08	0,98

*Oznaczenia jak pod rysunkiem 1

*Designation as under Fig. 1

Stała a (tablica 1) jest związana z masą cząsteczkową asfaltu i z jego kohezją. Lepiszczce odzyskane z MMG pobranej z koleiny (RD) ma większą lepkość dynamiczną niż uzyskane z nawierzchni bez kolein (N), co wskazuje na szybszy proces starzenia tej części nawierzchni. Ponadto szybkość spadku lepkości (nachylenie prostej w układzie pół-logarytmicznym) wskazuje na duży opór przepływu asfaltu z dodatkiem wapna hydratyzowanego (HL) i ni-newtonowskie zachowanie takiej cieczy. Wskazuje to na szybsze powstawanie struktury mastyksu (asfalt-wypełniacz) w przypadku wapna hydratyzowanego niż aminy tłuszczowej. Potwierdzają to obserwacje stanu warstwy ścieralnej nawierzchni wykonanej z mieszanki mastyksowo-grysowej, na której nie występowały nadmierne odkształcenia plastyczne.

Rozszerzeniem oceny związanej z efektem powstawania struktury w lepiszczu uzyskanym w wyniku zastosowania dodatku wapna hydratyzowanego lub aminy tłuszczowej są badania lepkości zerowego ścinania, reprezentujące poziom lepkości struktury nienaruszonej, w której ścinanie następuje w zakresie liniowej sprężystości materiału. Pomiar wykonano metodą ścinania sta-



Rys. 2. Właściwości lepiszcza odzyskanego z mieszanki mastyksowo-grysowej: a) lepkość dynamiczna oraz wzrost lepkości zerowego ścinania przy częstotliwości $f = 0,005$ Hz w temperaturze 60°C b) wzrost odkształcenia w ciągu 15 minut

Fig. 2. a) Dynamic viscosity and zero shear viscosity at the frequency $f=0,005$ Hz both at the temperature 60°C, b) increase of shear rate for 15 minutes of the bitumen extracted from SMA pavement

additive. The deformation rate, which is necessary to determine the zero shear viscosity, is directly linked with the behaviour of bitumen under traffic load conditions. According to ZSV measurements the use of hydrated lime addition to SMA mixture significantly reduces the rate of deformation of bituminous pavement (Fig. 2b). The increase of dynamic viscosity and ZSV of the binder extracted from the SMA determined at 60°C shows different relation which are caused by the measurements methods. Dynamic viscosity, was tested in the second Newtonian region of the non-Newtonian liquid, but ZSV was determined for the shear rate, close to zero. Therefore, the ZSV results may be attributed to the second Newtonian region. The performance of the bitumen is much better determined by ZSV parameter. From the results shown in Fig. 2a it can be concluded that the addition of hydrated lime significantly increase the viscosity of the bitumen which minimizes the deformations of SMA pavement. A little increase in ZSV in the case of HL-N reveals the strong effect of ageing process of the bitumen. In the case of fatty amine addition ZSV values are lower. Both for A-N and A-RD they fluctuate around the viscosity of 1000 Pas. According to the Morea et al. (16) viscosity below 1000 Pas mean the possibility of the beginning of uncontrolled plastic pavement deformation, caused by the destruction of the molecular equilibrium in SMA mixture.

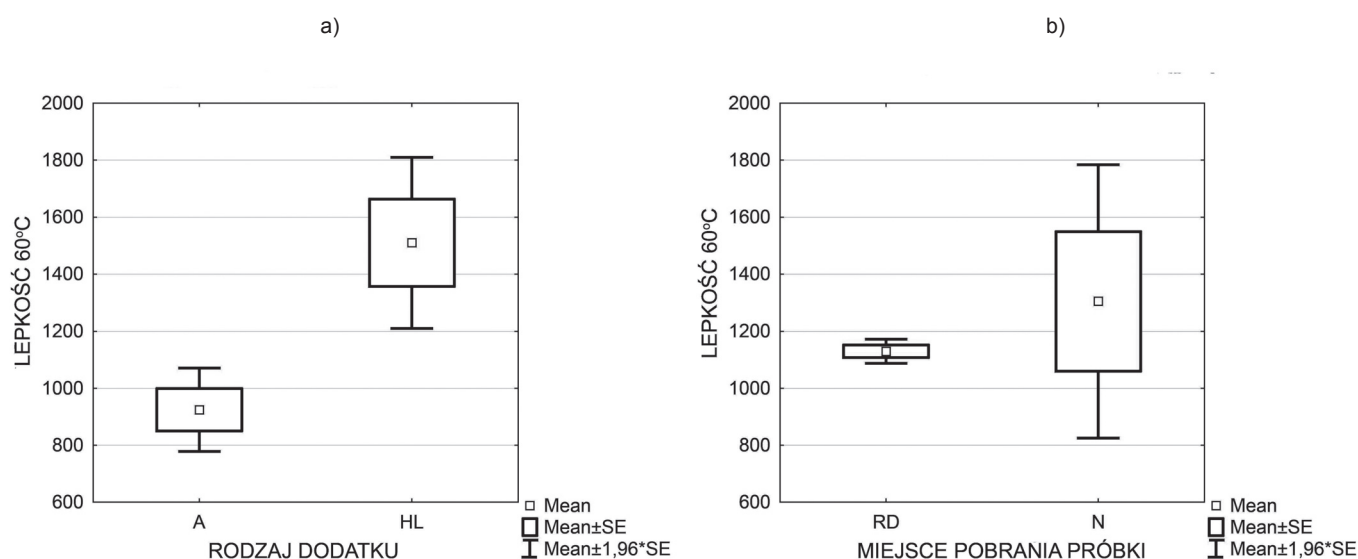
The kind of binder and the place on pavement of the sample uptake influence the range of viscosity distribution measured at 60°C, that is shown in Figs. 3 and 4.

The tests results show a high influence of the kind of addition and sampling place on the dynamic viscosity at 60°C of the extracted binder. The addition of hydrated lime caused the increase of the dynamic viscosity of about 80%. This also affects undoubtedly the reduction of plastic deformation of SMA in comparison to the binder with fatty amine addition. Simultaneously the dynamic viscosity of the samples taken from the rut (RD) is about 18% higher than that out the rut (N). It can be probably caused by the higher compaction of the SMA in the rut. In the case of the samples taken in the rut (RD) the range of the test results distribution was lower than for the mix sampled out of the rut (N) (Fig. 4b).

2.2. Oscillatory test of bitumens at 60°C

In order to obtain of more detailed results of the influence of the hydrated lime on the rheological properties of the extracted binder from SMA the phase angle displacement δ was measured. This parameter expresses a relation of the elastic to the viscous component of the complex modulus G^* (13). In this study the forced oscillation test according to SHRP was used (15). In the case of ideal elastic body δ is equal 0°, and for the viscous body δ is 90°. Therefore, for the viscoelastic materials, the angle can change from 0° to 90°. The samples of extracted binders were prepared for testing in accordance with PN-EN 12594:2004 and for the measurement of the phase angle the oscillation frequency in range from 0.05 Hz to 10 Hz, was applied. It simulates the most probable loading time (Figs. 5 and 6).

The obtained results (Fig.5a) show a lower phase angle in the case of the bitumen extracted from the SMA sample with the hydrated



Rys. 3. Zakresy zmian lepkości dynamicznej lepiszcza w 60°C, odzyskanego z mieszanki mastyksowo-grysowej; a) rodzaj dodatku do mieszanki: A z aminą tłuszczową, HL – wapno hydratyzowane, b) miejsce poboru próbek mieszanki: RD – próbka z koleiny, N – próbka pobrana poza koleinę

Fig. 3. Range of the dynamic viscosity distribution at 60°C of extracted bitumen from SMA (a – type of additive, b – place of the samples uptake)

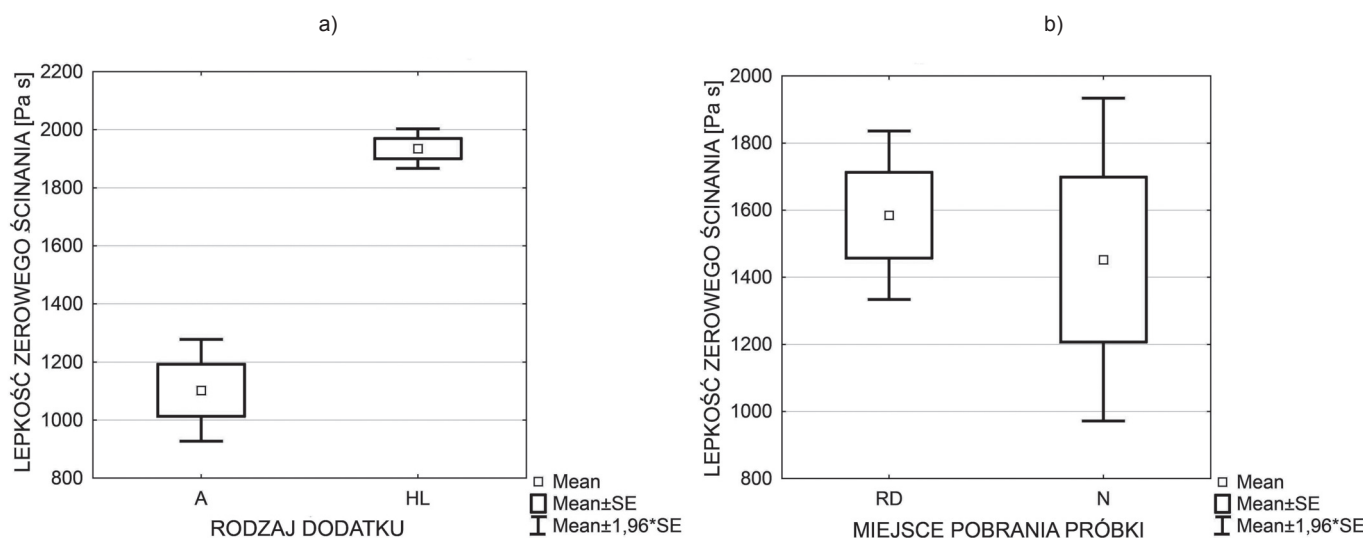
A - binder extracted from the mixture with the fatty amine additive, HL - binder extracted from the mixture with hydrated lime, RD – binder from the mixture taken from the rut surface, N - binder from the mixture sample out of rut

tycznego, przy naprężeniach ścinających znajdujących się w tym zakresie. Lepkość zerowego ścinania η_0 jest bezpośrednio związana z szybkością deformacji asfaltu przy danym naprężeniu i wyraża kąt nachylenia stycznej przyrostu deformacji asfaltu (w stanie ustalonego płynięcia) do osi czasu. Wzrost lepkości zerowego ścinania świadczy o zwiększeniu sprężystości lepiszcza asfaltowego. Lepkość zerowego ścinania mierzono przy naprężeniu ścinającym równym 25 Pa, a czas pomiaru wynosił 1 h. Lepkości zerowego ścinania określano zgodnie z CEN/TS 15325:2008, a uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 2.

Należy podkreślić, że lepkość związana ze strukturą lepiszcza jest większa w przypadku lepiszcza z dodatkiem wapna hydratyzowanego, w porównaniu z aminą tłuszczową. Szybkość wzrostu odkształcenia, niezbędnego do wyznaczenia lepkości zerowego ścinania, wiąże się bezpośrednio z deformacją asfaltu pod obciążeniem eksploatacyjnym drogi. Dodatek wapna hydratyzowanego do mieszanki mastyksowo-grysowej (MMG) wskazuje na jego znaczny wpływ zmniejszający szybkość deformacji nawierzchni zawierającej ten składnik (rysunek 2b). Przyrosty lepkości dynamicznej lepiszcza, odzyskanego z MMG, zmierzony w temperaturze 60°C oraz LZŚ są różne. Zróznicowanie to związane jest z przyjętą metodą badań. Lepkość dynamiczna według wymagań normowych jest badana w II zakresie Newtona dla cieczy nienewtonowskich. Natomiast pomiar lepkości LZŚ odbywa się przy szybkości ścinania dążącej do zera. W związku z tym, lepkość LZŚ może być przypisana I zakresowi Newtona. Do oceny występowania struktury w lepiszczu lepszą metodą jest pomiar lepkości LZŚ. Analiza wyników (rysunek 2a) wykazuje, że dodatek wapna hydratyzowanego znacznie zwiększa sprężystość asfaltu, w związku z utworzeniem silniejszej struktury co zmniejsza odkształcalność asfaltu, a więc także nawierzchni drogowej. Pewien wzrost lepkości wynikający

z dodatku wapna hydratyzowanego, jest spowodowany przez dodatek wapna hydratyzowanego. Furthermore, this binder has the higher complex modulus G^* . Its high level and the decrease of phase angle δ shows that the binder with the addition of the hydrated lime has a high elasticity. Conclusions from the measurements of the parameter $G^*/\sin\delta$ according to the SHRP (13) (Fig.5b) are in good correlation with the results of the ZSV examination. All tested binders achieved higher $G^*/\sin\delta$ parameter than the required threshold value equal 1000 Pa for non-ageing binder. Taking into consideration that the binders were extracted from the SMA applied in the road pavement after 12 years of exploitation thus for the assessment of critical parameter this value should correspond to the bitumen samples after simulated ageing process RTFOT (PN-EN 12607-2:2002) which equals 2200 Pa. For comparison of the obtained results it should be underlined that the hydrated lime caused an increase of $G^*/\sin\delta$ parameter which means the elasticity of the SMA. However, in the case of fatty amine addition to the binder the plastic component was increased.

The obtained results for the elastic (G') and the viscous (G'') components of the complex modulus G^* show that the bitumen located in the rut (RD) and out of rut (N) have different properties. The bitumen extracted from SMA pavement sampled in the rut (RD) was subjected to compacting which reduced oxidation of the asphalt pavement and the losses of the SBS polymer. It is the reason of the differences in the results between the elastic component, which became higher, than the viscous component of the complex modulus G^* of the bitumen (Fig. 6b). In the case of binder sample HL-RD extracted from the SMA the examination at temperature of 60°C has shown that it is elastic. However, in the case of the bitumen with the addition of fatty amine (A-RD), the ageing caused probably the degradation of SBS, decreasing the molecular mass distribution of the bitumen and increase its plasticity.



Rys. 4. Zakres zmian lepkości zerowego ścinania w temperaturze 60°C (a – rodzaj dodatku, b – miejsce poboru próbki mieszanki) lepiszcza wydzielonego z MMG. Oznaczenia jak na rys. 3

Fig. 4. The range of the ZSV test results distribution at 60°C of the bitumen extracted, from SMA: (a – type of additive, b – place of sampling)

z przyrostu LZŚ w przypadku HL-N związany jest z przyspieszeniem starzenia się asfaltu. Natomiast w przypadku aminy tłuszczowej lepkość plastyczna asfaltu, określona na podstawie LZŚ jest mniejsza. W przypadku mieszanek A-N i A-RD wartość ta oscyluje wokół 1000 Pa s, co według Morea i.in. (16) wskazuje na możliwość wystąpienia niekontrolowanych odkształceń plastycznych, związanych z naruszeniem stanu równowagi cząstek w asfalcie i mieszance mastyksowo-grysowej.

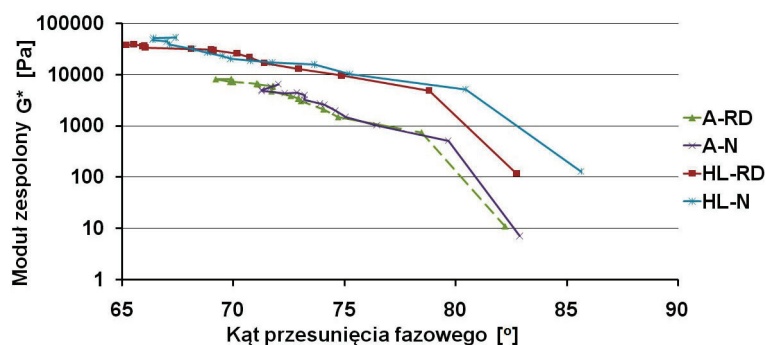
Wpływ rodzaju lepiszcza oraz mniejszy miejsca poboru próbek na wyniki zmian lepkości w temperaturze 60°C pokazano na rysunku 3 oraz 4.

Wyniki pomiarów wskazują na duży wpływ rodzaju dodatku oraz miejsca pobrania próbek mieszanki na lepkość dynamiczną w temperaturze 60°C lepiszcza odzyskanego z MMG. Dodatek wapna hydratyzowanego zwiększył lepkość dynamiczną o około 80%. Natomiast lepkość dynamiczna próbek pobranych poza koleinami (N) jest większa o 18% od próbek lepiszcza pobranych w koleinie (RD). Można przypuszczać, że lepiszcze uzyskane z mieszanki pobranej w koleinie, wykazuje większy stopień zagęszczenia mieszanki mastyksowo-grysowej, w wyniku zwiększonego nacisku kół pojazdów.

Ta sama zależność występuje w odniesieniu do lepkości zerowego ścinania lepiszcza odzyskanego z mieszanki mastyksowo-grysowej pobranego w koleinach (RD).

2.2. Badania oscylacyjne lepiszcza w temperaturze 60°C

W celu pełniejszego wyjaśnienia wpływu dodatku wapna hydratyzowanego na właściwości reologiczne lepiszcza w mieszance mastyksowo-grysowej zmierzono kąt przesunięcia fazowego δ , który jest miarą stosunku składowej plastycznej do sprężystej w module zespolonym G^* (13). Badania wykonano metodą oscylacji wymuszonych, podaną przez Sybilskiego (13). W przypadku



Rys. 5. Oscylacyjne parametry reologiczne asfaltów w temperaturze 60°C: a) moduł zespolony G^* ; b) parametr $G^*/\sin\delta$ (13)

Fig. 5. Oscillation rheological parameters of bitumens at 60°C: a) complex modulus G^* ; b) parameter $G^*/\sin\delta$ (13)

ty. These results show the advantageous of the elasticity increase of the asphalt pavement with the hydrated lime (HL) addition to the SMA in comparison with the fatty amine additive (A) (Fig. 6a).

3. Conclusions

From the test results of the binder extracted from the SMA samples of the surface of pavement, after 12 years of exploitation, the following conclusions can be drawn:

- the hydrated lime addition has an advantageous effect on the rheological properties of bitumen, increasing the dynamic viscosity at a temperature range from 60°C to 135°C, complex modulus G^* , the phase angle δ and the zero shear viscosity in comparison to the bitumen with the fatty amine (A) additive,
- the interaction synergy of the hydrated lime and SBS polymer assured the required properties of the bitumen D70 (50/70) during the twelve years of exploitation of the SMA pavement,
- the binder extracted from SMA with hydrated lime sampled in the rut (HL-RD) had a more favorable properties than obtained

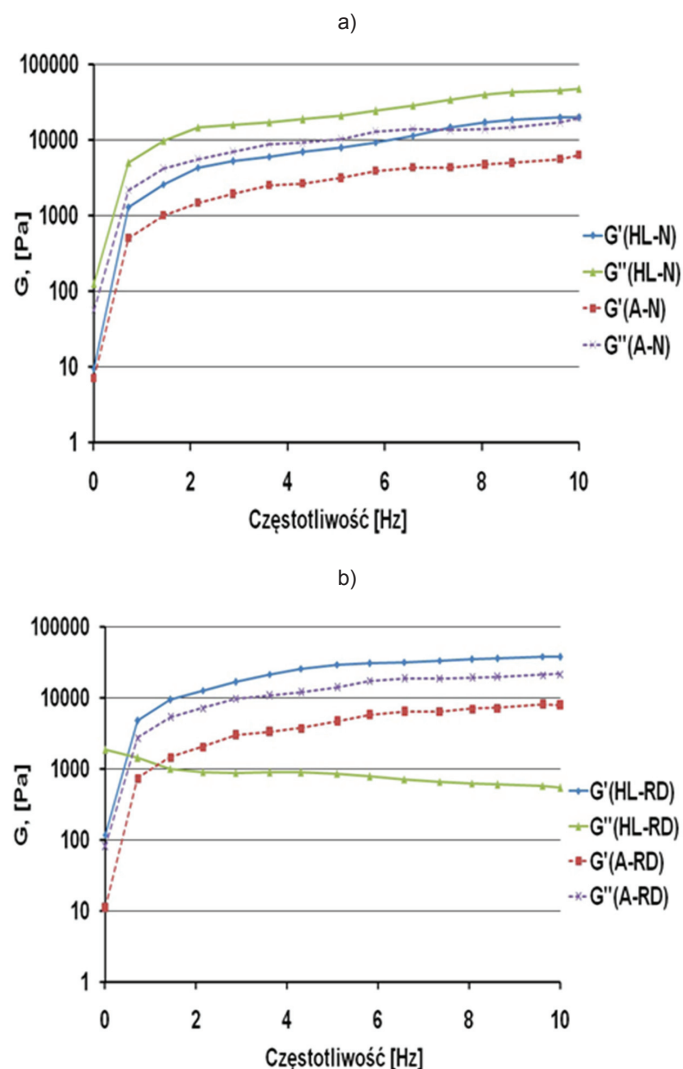
materiału doskonale sprężystego $\delta = 0^\circ$, a materiału doskonale plastycznego $\delta = 90^\circ$. W związku z tym, w przypadku materiałów lepkosprężystych δ zmienia się w przedziale od 0° do 90° . Próbkę lepiszcza zostały przygotowane do badań zgodnie z normą PN-EN 12594:2004. Pomiar kąta przesunięcia fazowego lepiszcza odzyskanego z mieszanki mastyksowo-grysowej wykonano przy częstotliwości oscylacji od 0,05 do 10 Hz, która symuluje najbardziej prawdopodobne warunki obciążenia nawierzchni drogowej ruchem pojazdów (rysunki 5 i 6).

Uzyskane wyniki (rysunek 5a) wskazują na mniejszy kąt przesunięcia fazowego w przypadku lepiszcza odzyskanego z MMG z wapnem hydratyzowanym, która była wbudowana w nawierzchnię drogową. To lepiszcze ma także większy moduł zespolony G^* . Jego duża wartość oraz mniejszy kąt przesunięcia fazowego δ wykazują, że lepiszcze z dodatkiem wapna hydratyzowanego ma dużą sprężystość. Wnioski z pomiaru parametru $G^*/\sin\delta$ (metoda SHRP) (rysunek 5b) są zgodne z wynikami pomiarów lepkości zerowego ścinania tego lepiszcza. Wszystkie badane lepiszcza osiągnęły większe wartości parametru $G^*/\sin\delta$ niż wymagana wartość graniczna 1000 Pa, dla lepiszcza z mieszanki nie wykazującej objawów starzenia. W związku z tym, że lepiszcze zostało odzyskane z próbki MMG, pobranej z nawierzchni drogowej eksploatowanej przez 12 lat, do oceny można przyjąć poziom parametru krytycznego stosowany po procesie symulacji starzenia według normy PN-EN 12607-2:2002, który wynosi 2200 Pa. Porównując wyniki uzyskane w przypadku różnych inhibitorów starzenia należy podkreślić, że wapno hydratyzowane spowodowało wzrost parametru $G^*/\sin\delta$ i tym samym zwiększyło sprężystość asfaltu. Natomiast w przypadku dodatku aminy tłuszczowej do lepiszcza można stwierdzić, że powiększa ona składową plastyczną asfaltu.

Uzyskane wyniki składowej sprężystej (G') oraz plastycznej (G'') modułu zespolonego G^* wykazują, że lepiszcze w mieszance pobranej w koleinie (RD) i poza nią (N) ma różne właściwości. W przypadku lepiszcza odzyskanego z mieszanki mastyksowo-grysowej pobranej w koleinie zwiększenie jej zagęszczenia przez ruch pojazdów zmniejszyło utlenianie asfaltu oraz straty polimeru SBS. Tym samym spowodowało to wyraźne zwiększenie składowej sprężystej, w stosunku do składowej plastycznej modułu zespolonego G^* lepiszcza (rysunek 6b). W przypadku lepiszcza z mieszanki pobranej z koleiny nawierzchni drogowej (HL-RD), badania w temperaturze 60°C wykazały, że ma ono dużą sprężystość. Natomiast w przypadku asfaltu z dodatkiem aminy tłuszczowej (A-RD) starzenie spowodowało prawdopodobnie większy rozpad polimeru, ograniczenie zmniejszenia masy cząsteczkowej asfaltu oraz wzrost jego plastyczności. Te wyniki badań wskazują na korzystny wzrost sprężystości asfaltu w przypadku dodatku wapna hydratyzowanego (HL) do mieszanki mastyksowo-grysowej, w porównaniu z wpływem aminy tłuszczowej (A) (rysunek 6a).

3. Wnioski

Wyniki badań lepiszcza odzyskanego z mieszanki mastyksowo-grysowej pobranej z nawierzchni drogowej po 12 latach eksploatacji pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:



Rys. 6. Składowa sprężysta (G') i składowa plastyczna (G'') modułu zespolonego w temperaturze 60°C w funkcji częstotliwości: a) próbki lepiszcza z mieszanki pobranej poza koleiną N; b) próbki lepiszcza z mieszanki pobranej w koleinie RD

Fig. 6. Elastic (G') and viscous component (G'') at 60°C of the complex modulus G^* versus frequency a) the binder of the sample out of rut (N); b) the binder of the sample in the rut (RD)

out of the rut (HL-N). It may be probably the result of the compaction of the bitumen in the rut,

- the addition of the hydrated lime the bitumen D70 (50/70) modified with the polymer SBS is assuring the good durability of SMA during twelve years of road exploitation. The experimental results bring important information to the database of the effect of the hydrated lime addition to the bitumen in the field conditions of road pavement exploitation, showing the usefulness of hydrated lime application in the SMA technology contributing to the better its implementation in the technology of the asphalt mixes.

Literatura / References

1. A. Verhasselt, D. Puiatti, Effect of hydrated lime on ageing behaviour of bituminous mastics. Proc. 3rd Euroasphalt and Eurobitume Congress, vol. 1, paper 108, p. 746-756 Vienna 2004.

- zastosowanie wapna hydratyzowanego ma korzystny wpływ na właściwości reologiczne lepiszcza. Te właściwości obejmowały lepkość dynamiczną w zakresie temperatur od 60 do 135°C, moduł zespolony G^* , kąt przesunięcia fazowego δ oraz lepkość zerowego ścinania lepiszcza odzyskanego z próbki mieszanki mastykowo-grysowej pobranej z nawierzchni drogowej. Były one korzystniejsze niż w przypadku zastosowania aminy tłuszczowej,
- równoczesny wpływ – synergia – wapna hydratyzowanego i polimeru SBS zapewnia dobre właściwości asfaltu D70 (50/70) potwierdzone w dwunastoletnim okresie eksploatacji nawierzchni wykonanej z mieszanki mastykowo-grysowej,
- lepiszcze wydzielone z mieszanki mastykowo-grysowej z dodatkiem wapna hydratyzowanego pobranej z koleiny w nawierzchni (HL-RD) ma korzystniejsze właściwości niż pobrane z nawierzchni bez kolein (HL-N), co może łączyć się z większym zagęszczeniem asfaltu w koleinach,
- dodatek wapna hydratyzowanego wpływa korzystnie na właściwości asfaltu D70 (50/70) modyfikowanego polimerem SBS, zapewniając dobrą trwałość nawierzchni wykonanej z mieszanki mastykowo-grysowej w ciągu dwunastu lat jej eksploatacji.

Uzyskane wyniki badań dostarczają ważnych danych dotyczących wpływu wapna hydratyzowanego na właściwości asfaltu w rzeczywistych warunkach eksploatacji nawierzchni drogowej. Wskazują one na celowość stosowania dodatku wapna hydratyzowanego w produkcji mieszanek mastykowo-grysowych.

2. S. C. Huang, Impact of lime modification of asphalt and freeze-thaw cycling on the asphalt-aggregate interaction and moisture resistance to moisture damage, *J. Materials in Civil Engineering*, **17**, 6, 711-718 (2005).
3. J. Judycki, P. Jaskuła, Badania odporności betonu asfaltowego zawierającego wapno hydratyzowane na działanie wody i mrozu, s. 111 – 118, V Międzynarodowa Konferencja Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe, 11 – 12 maj, Kielce 1999.
4. F. Luxemburg, Lime hydrate as an additive to improve the adhesion of bitumen to the aggregates, p. 296-302, II Międzynarodowa Konferencja Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe, 15-16 May, Kielce 1996.
5. A. Santon, D. Puiatti, D. Walter, Modification du bitume et des enrobes bitumineux par ajout de chaux hydratee. *Revue Generale des Routes et Aerodromes*, **770**, p. 3-10 (1999).
6. J. C. Petersen, H. Plancher, P. M. Harnsberger, Lime Treatment of Asphalt to Reduce Age Hardening and Improve Flow Properties, *Proc. Association Asphalt Paving Technologies* **56**, p. 632-653 (1987).
7. M. Iwański, Wpływ wapna hydratyzowanego na właściwości fizyko-mechaniczne betonu asfaltowego, s. 77-84, IX Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, 6-7 maj, Kielce 2003.
8. J. Piłat, M. Kalabińska, P. Radziszewski, Mieszanki mineralno-asfaltowe z dodatkiem mialu gumowego i wapna hydratyzowanego, *Materiały Budowlane*, **11**, s. 60-62 (2000).
9. T. W. Kennedy, Use of hydrated lime in asphalt paving mixtures. *National Lime Association Bulletin*, **325** (1984).
10. J. Piłat, J. Radziszewski, Nawierzchnie asfaltowe, s. 540, WKiŁ, Warszawa 2010.
11. M. Iwański, G. Mazurek, Durability of SMA pavement with hydrated lime, Paper nr 0355, p. 8, 5th Euroasphalt and Eurobitume Congress, 13-15 June, Istanbul, Turkey 2012.
12. J. Gaweł, M. Kalabińska, J. Piłat, *Asfalty drogowe*. WKiŁ. Warszawa 2001.
13. D. Sybilski, Zastosowanie metod SHRP do oceny nawierzchni dróg w Polsce. *IBDiM*, **50**, 168, Warszawa 2000.
14. G. S. Haake, “Practical approach to rheology and rheometry”, p. 272, Gebrueder Haake GmbH, Karlsruhe 1994.
15. F. Morea, R. Zerbino, J. Agnusdei, Improvements on asphalt mixtures rutting performance characterization by the use of low shear viscosity, *Materials and Structures*, **46**, 267-276 (2013).