



KRZYSZTOF KOŁODZIEJ¹⁾
 LESŁAW BICHAJŁO²⁾
 TOMASZ SIWOWSKI³⁾

INFLUENCE OF COMPOSITION AND PROPERTIES OF MASTIC WITH NATURAL ASPHALT ON MASTIC ASPHALT MIXTURE RESISTANCE TO PERMANENT DEFORMATION

WPŁYW SKŁADU I WŁAŚCIWOŚCI MASTYKSU Z ASFALTEM NATURALNYM NA ODPORNOŚĆ ASFALTU LANEGO NA DEFORMACJE TRWAŁE

STRESZCZENIE. Mastyks asfaltowy ma duży wpływ na właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej. O jego cechach decydują nie tylko właściwości poszczególnych składników, ale także wzajemne proporcje między nimi – głównie stosunek wypełniacz/lepiszcze. Do oceny mastyksu można stosować te same metody badań, co do oceny asfaltów drogowych, traktując go jako lepiszcze o bardzo dużej lepkości. Wyniki badań mogą posłużyć do wstępnego projektowania składu mieszanki asfaltu lanego, zwłaszcza w kontekście trwałości nawierzchni na obiektach mostowych, gdzie asfalt lany stanowi warstwę ochronną izolacji. W artykule przedstawiono wyniki badań ciągliwości mastyksu i odporności na deformacje trwałe asfaltu lanego, zawierających asfalt drogowy 35/50 zmodyfikowany dodatkiem asfaltu naturalnego Trinidad Epuré. Celem przeprowadzonych badań było ustalenie wpływu stosunku wypełniacz/lepiszcze oraz dodatku asfaltu naturalnego na umowną energię rozciągania w badaniu ciągliwości, a także określenie korelacji pomiędzy właściwościami mastyksu zawierającego zmodyfikowane lepiszcze a cechami mieszanki asfaltu lanego.

SŁOWA KLUCZOWE: asfalt lany, asfalt naturalny, mastyks asfaltowy, odporność na deformacje trwałe, stosunek wypełniacz/lepiszcze.

ABSTRACT. Properties of an asphalt mixture are significantly influenced by the mastic, whose characteristics are related not only to the properties of its ingredients, but also to their relative content – especially to the filler-binder ratio. Assessment of mastic may be performed using the same test methods as those used for road bitumen, treating the material as if it were a very viscous binder. The results may be useful in preliminary design of mastic asphalt mixtures, particularly in the context of service life of road bridge pavements, where mastic asphalt provides a protective layer over the waterproofing. The article presents the results of ductility tests performed on mastic as well as permanent deformation resistance tests performed on mastic asphalt mixture. The materials were based on road bitumen 35/50 modified with an addition of natural Trinidad Epuré bitumen. The aim of the research was to determine the influence of the filler-binder ratio and the quantity of the natural bitumen additive on the conventional tensile energy in ductility test as well as to determine the correlation between the properties of mastic containing the modified binder and the characteristics of the obtained mastic asphalt mixture.

KEYWORDS: filler-binder ratio, mastic, mastic asphalt, natural asphalt, resistance to permanent deformation.

DOI: 10.7409/rabdim.021.004

¹⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Katedra Dróg i Mostów, ul. Poznańska 2, 35-084 Rzeszów, krzych@prz.edu.pl (✉)

²⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Katedra Dróg i Mostów; leszbich@prz.edu.pl

³⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Katedra Dróg i Mostów; siwowski@prz.edu.pl

1. WSTĘP

Nawierzchnia jezdni obiektu mostowego w dużej mierze decyduje o trwałości całego obiektu [1-3]. Nawierzchnia mostowa pracuje w bardzo specyficznych warunkach obciążenia; poddawana jest dużym obciążeniom wywołanym przez ruch pojazdów samochodowych (siły pionowe i poziome od pojazdów), obciążeniom wywołanym przez odkształcenia pomostu i oddziaływaniom środowiskowym, jak wysokie i niskie temperatury, woda, sól odladzająca jezdnię, środki ropopochodne itp. Ze względu na te szczególne warunki obciążenia nawierzchnia na obiektach mostowych ulega uszkodzeniom znacznie wcześniej niż nawierzchnia na korpusie drogowym. Ponadto uszkodzenia te są bardziej uciążliwe dla użytkownika drogi i administracji odpowiedzialnej za utrzymanie infrastruktury drogowej. Dlatego w celu uzyskania odpowiedniej trwałości nawierzchnie mostowe wymagają właściwego doboru materiałów i odpowiedniej technologii wykonania [4].

Nawierzchnie na obiektach mostowych w Polsce wykonuje się z mieszanek mineralno-asfaltowych. Jako nawierzchnie mostowe preferowane są mieszanki o dużej zawartości mastyksu i o strukturze zamkniętej (o zawartości wolnej przestrzeni poniżej 4,5% v/v). Są to głównie mieszanki asfaltu lanego (MA) i mastyksu grysowego (SMA) [2, 4]. Szczególnie popularny w ostatnich latach jest asfalt lany, który w odróżnieniu od innych mieszanek nie wymaga zagęszczania i zapewnia pełną szczelność nawierzchni oraz zwiększoną trwałość zmęczeniową [5, 6]. Wadą asfaltu lanego jest mniejsza odporność na odkształcenia trwałe niż w przypadku innych mieszanek mineralno-asfaltowych. Dlatego dotychczasowe zastosowanie asfaltu lanego w budownictwie mostowym w Polsce było ograniczone praktycznie tylko do warstw ochronnych izolacji mostowych, tworzących dodatkowe wodoszczelne zabezpieczenie płyty pomostu [7]. W ostatnich latach wykonano nawierzchnie także z warstwą ścieralną z asfaltu lanego, jednak tylko na kilku obiektach. Zastosowanie jednej lub dwóch warstw asfaltu lanego w nawierzchni obiektu mostowego stanowi bardzo dobrą ochronę płyty pomostu ze względu na wysoką szczelność tej mieszanki (zawartość wolnych przestrzeni poniżej 1%). W porównaniu do standardowych nawierzchni z betonu asfaltowego (AC) czy SMA, asfalt lany ma większą trwałość eksploatacyjną, wynikającą z dużej zawartości lepiszcza asfaltowego w mieszance. Skala zastosowania asfaltu lanego do warstw ścieralnych nawierzchni mostowych w Polsce jest nadal znikoma, mimo kilku udanych prób [5]. Główne obawy dotyczą deformacji lepkoplastycznych (kolein) nawierzchni MA, powstających pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych w wysokich wartościach temperatury. Szytywne podłoże płyty pomostu powoduje bowiem wzrost naprężeń w nawierzchni i w efekcie przyspieszone jej koleinowanie.

1. INTRODUCTION

Pavement used on a bridge affects the lifespan of the entire structure to a large extent [1-3]. A bridge pavement is subjected to very specific loading conditions during its service; it is subjected to considerable loads from vehicle traffic (vertical and horizontal forces), loading due to deck displacements and environmental effects, as well as the impact of high and low temperatures, water, de-icing salts, petroleum products etc. As a result of the unique loading conditions, distress of bridge pavements occurs much earlier than in the case of pavements on typical road sections. Moreover, such distress is more problematic for road users and administration responsible for road infrastructure maintenance. Therefore, in order to provide satisfactory service life, bridge pavements require proper selection of materials and adequate placement technology [4].

Road pavements in Poland are constructed using asphalt mixtures. The types of mixtures preferred for bridge pavements are characterized by high mastic content and a closed structure (air void content below 4.5% v/v). They primarily include mastic asphalt mixtures (MA) and stone mastic asphalt mixtures (SMA) [2, 4]. Mastic asphalt has been particularly popular in the last years, since - in contrast to other mixtures - it does not require compaction and provides impermeability as well as greater fatigue life of the pavement [5, 6]. The drawback of mastic asphalt in comparison to other mixtures is its lower resistance to permanent deformation. Therefore, application of mastic asphalt in bridge construction in Poland has been mostly limited to protective layers, providing additional waterproofing of the deck [7]. In the last years pavements with mastic asphalt wearing courses have been constructed as well, but only on several bridges. Application of one or two layers of mastic asphalt in bridge pavement provides very good protection of the bridge deck due to low permeability of the mixture (air void content below 1%). In comparison with standard asphalt concrete (AC) or SMA pavements, mastic asphalt has longer service life resulting from high content of bituminous binder in the mix. The use of mastic asphalt in wearing courses in Poland is still marginal, despite several successful applications [5]. The main concern with MA courses is the possibility of occurrence of viscoplastic deformation (rutting), resulting from high service loads at high temperatures, as the underlying rigid deck contributes to an increase in stress in the pavement and, consequently, to its accelerated rutting.

The basic ingredient that determines the final properties of every asphalt mixture is the bituminous binder. Use of binders with sufficiently wide viscoelastic range is

Podstawowym składnikiem każdej mieszanki, determinującym jej końcowe właściwości, jest lepiszcze asfaltowe. Zastosowanie lepiszczy asfaltowych o wystarczająco szerokim zakresie lepkości ma szczególne znaczenie w przypadku nawierzchni mostowych, które są w znacznie większym stopniu narażone na oddziaływania termiczne niż nawierzchnie drogowe. W celu poprawy właściwości użytkowych mieszanek mineralno-asfaltowych oraz wydłużenia okresu eksploatacji nawierzchni stosuje się asfalty modyfikowane (asfaltem naturalnym [8-10], polimerem, gumą). Jednym z przykładów jest nawierzchnia mostu w Toruniu [11], gdzie zastosowano asfalt modyfikowany. Do najważniejszych korzyści wynikających z użycia asfaltu naturalnego jako dodatku zalicza się m.in.: optymalizację strukturalnych właściwości lepiszcza (mniejsza kruchość i większa odporność na starzenie asfaltów drogowych), poprawę przyczepności lepiszcza do materiału mineralnego, znaczną poprawę urabialności i zagęszczenia mieszanki oraz finalnie zwiększenie odporności mieszanki na deformacje trwałe i na zmęczenie [12].

Lepiszczce asfaltowe wraz z wypełniaczem tworzą mastyks [13], którego głównym zadaniem w mieszance mineralno-asfaltowej jest związanie ziaren kruszywa grubego oraz niedopuszczenie do ich segregacji. Oprócz tego mastyks zapewnia wypełnienie wolnych przestrzeni między ziarnami grubszego kruszywa (piasku i grysów), spójność mieszanki, wodoszczelność i mrozoodporność oraz przenosi naprężenia rozciągające [13-15]. Właściwości mastyksu zależą w dużej mierze od właściwości składników wyjściowych [16]. W przypadku lepiszcza największy wpływ ma typ lepiszcza asfaltowego i jego cechy chemiczne oraz ewentualna obecność i ilość dodatku modyfikującego [13, 16]. W przypadku wypełniaczy istotne są jego rodzaj i pochodzenie, właściwości fizyczne (kształt ziaren wypełniacza, uziarnienie, powierzchnia właściwa) oraz chemiczne, a także zawartość wolnych przestrzeni [17-22]. Jednakże podstawowym parametrem decydującym o właściwościach mastyksu asfaltowego jest jego skład [23-25], czyli odpowiednio dobrana proporcja wypełniacza i lepiszcza w/l . Mastyks nie może być zbyt ubogi w lepiszcze, gdyż będzie zbyt sztywny i kruchy. Efektem jest wówczas zwiększona podatność nawierzchni na pękanie. Z kolei przy stopniowym zwiększaniu zawartości lepiszcza występuje efekt poślizgu lub smarowania ziaren kruszywa, co prowadzi do zmniejszenia odporności nawierzchni na powstawanie deformacji trwałych. Zwiększanie zawartości wypełniacza powoduje, że pojawia się efekt usztywniający, zwiększający odporność na deformacje trwałe [26]. Poglądy w kwestii optymalnego stosunku w/l w mieszankach mineralno-asfaltowych zmieniały się na przestrzeni lat. Początkowo zalecano przedział 0,6-1,2 niezależnie od rodzaju mieszanki. Obecnie zaleca się, aby w mieszankach

especially important in bridge pavements, which are much more exposed to thermal effects than typical road pavements. In order to improve asphalt mixture performance and extend pavement service life, bitumen modification is often used (by means of natural asphalt [8-10], polymer, rubber). The pavement of the bridge in Toruń [11], where modified bitumen was used, is an example of such application. The most important advantages of using natural asphalt as modifier include: optimization of structural properties of the binder (lower brittleness and greater resistance to aging), improvement of binder adhesion to mineral material, significant improvement of workability and compaction of the mixture and, ultimately, its greater resistance to permanent deformation and fatigue [12].

The bituminous binder and filler comprise mastic [13], whose main role in the asphalt mix consists in binding of coarser aggregate grains and preventing their segregation. Furthermore, mastic fills the voids between aggregate particles (sand and stone); it provides mixture cohesion, impermeability, frost resistance as well as the capacity to withstand tensile stresses [13-15]. Characteristics of the mastic depend to a large extent on the properties of its basic ingredients [16]. In the case of the binder, the most significant factors include the type of the bitumen and its chemical properties as well as the possible use and content of a modifying additive [13, 16]. Significant characteristics of the filler include its type and origin, physical properties (particle shape, grading, surface area), chemical properties and air void content [17-22]. However, the most basic parameter that controls the properties of mastic is its composition [23-25], i.e. the correct choice of proportion between filler and binder content. Binder content in the mastic cannot be too limited, since it would lead to excessive stiffness and brittleness, which, in effect, renders the pavement overly susceptible to cracking. Nonetheless, with a gradual increase in binder content, the effect of sliding or lubrication of aggregate particles intensifies, leading to a decrease in resistance to permanent deformation of the pavement. An increase in filler content leads to a stiffening effect, which increases the resistance to permanent deformation [26]. The views on the optimum filler-binder ratio in asphalt mixtures have changed over the years. Initially a range of 0.6-1.2 was advised, regardless of the type of the mixture. Currently the recommendations state that the ratio should not exceed 1.6 in coarse-graded mixtures and 1.4 in fine-graded mixtures [27, 28]. The composition of mastic plays a vital role in terms of high resistance of mastic asphalt pavements to permanent deformation [29]. Therefore, identification of

gruboziarnistych współczynnik ten nie przekraczał 1,6, natomiast w mieszankach drobnoziarnistych 1,4 [27, 28]. Skład mastyksu asfaltowego odgrywa rolę kluczową w uzyskaniu wysokiej odporności na deformacje trwałe nawierzchni z asfaltu lanego [29]. W związku z tym znajomość optymalnej kompozycji mastyksu *w/l* może być podstawą do wstępnego zaprojektowania składu mieszanki asfaltu lanego MA, nawet przy znacznie mniejszej liczbie prób niż w klasycznym postępowaniu [30].

W artykule przedstawiono wyniki wybranych badań mastyksu z asfaltem drogowym 35/50 zmodyfikowanym dodatkiem asfaltu naturalnego Trinidad Epuré (ang. *Trinidad Lake Asphalt*, TLA), jak również badań odporności na deformacje trwałe mieszanki asfaltu lanego wytworzonej na bazie tego lepiszcza. Z uwagi na to, że mastyks można traktować jako lepiszcze o bardzo dużej lepkości, do jego oceny zastosowano te same metody badań, co do oceny asfaltów drogowych. Celem badań było określenie wpływu ilości modyfikatora TLA (% m/m) oraz stosunku wypełniacz/lepiszcze *w/l* na umowną energię rozciągania mastyksu asfaltowego, a następnie określenie korelacji pomiędzy właściwościami mastyksu a odpornością na deformacje trwałe mieszanki asfaltu lanego (MA). Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono ilościowy wpływ modyfikatora TLA oraz proporcji składników mastyksu *w/l* na wybrane właściwości wytworzonej na jego bazie mieszanki asfaltu lanego, charakteryzujące jej odporność na deformacje trwałe. Wskazano również wartości optymalne badanych parametrów ze względu na trwałość nawierzchni z MA.

2. MATERIAŁY

W badaniach zastosowano jako lepiszcze asfalt drogowy 35/50, niepoddany procesowi starzenia, modyfikowany dodatkiem asfaltu naturalnego Trinidad Epuré. Lepiszcze to znajduje powszechne zastosowanie w produkcji mieszanek asfaltu lanego. Podstawowe właściwości asfaltu drogowego 35/50 oraz asfaltu naturalnego Trinidad Epuré wyznaczono na podstawie przedmiotowych norm i zestawiono w Tabl.1. Były one zgodne z wymaganiami normy PN-EN 12591:2010 [31] oraz normy PN-EN 13108-4:2006 [32]. Przyjęto założenie, aby badania prowadzić na takiej postaci lepiszcza, jaka będzie dostępna dla wytwórcy mieszanki asfaltu lanego. Asfalt naturalny dostarczany przez producenta jest otoczony diatomitem (środkiem zapobiegającym sklejanemu się kawałków asfaltu) i w takiej postaci jest dodawany do mieszalnika. Stąd w badaniach opisywanych w artykule wykorzystywano tę postać TLA. Dodatek ten może usztywnić asfalt, co skutkuje wzrostem temperatury mięknięcia. Z tego powodu w prezentowanych wynikach badań pojawiają się różnice pomiędzy wartościami normowymi a uzyskanymi w badaniach.

optimum mastic composition (filler-binder ratio) may be the basis for preliminary design of a mastic asphalt mixture, even with considerably lower number of test trials than in classic procedures [30].

The article presents the results of chosen tests of mastic containing road bitumen 35/50 modified with natural Trinidad Epuré asphalt (TLA) as well as permanent deformation resistance tests performed on mastic asphalt mixture produced using the same binder. Due to the fact that mastic may be treated as if it were a binder with very high viscosity, it was assessed using the methods used for road binders. The aim of the research was to determine the impact of the quantity of the modifying TLA additive (% m/m) and the filler-binder ratio on the conventional tensile energy of mastic, as well as to determine the correlations between the properties of the mastic and the permanent deformation resistance of the mastic asphalt (MA) pavement. Based on the performed tests, a quantitative influence of the TLA modifier and the filler-binder ratio on chosen properties of the obtained mastic asphalt mixture that characterize its resistance to permanent deformation was observed. The optimum values of the investigated parameters were determined as well, taking into account the mastic asphalt pavement service life.

2. MATERIALS

Road bitumen 35/50, not subjected to aging, modified with addition of natural Trinidad Epuré asphalt (TLA), was used in the research. The chosen binder is widely used in production of mastic asphalt mixtures. The basic properties of both road bitumen 35/50 and Trinidad Epuré natural bitumen were determined in accordance with applicable standards and presented in Table 1. They meet the requirements set in the PN-EN 12591:2010 [31] and PN-EN 13108-4:2006 [32] standards. The authors decided to perform the tests on the same form of binder that would be available to the producer of mastic asphalt mixture. Natural asphalt is delivered to the customers in the form of grains coated with diatomite (which prevents their sticking to each other) and is added to the mixer in the same form. Therefore, this form of TLA was used in the research. This additive may increase the stiffness of the bitumen, which results in an increased softening point. Consequently, there are some differences between the presented test results and the values described in the standards.

Table 1. Properties of bitumens used for tests
 Tablica 1. Właściwości asfaltów użytych do badań

Bitumen 35/50 / Asfalt drogowy 35/50			
Property according to [31] Właściwość wg [31]	Test method Metoda badania	Requirements according to [31] Wymagania wg [31]	Test result Wynik badania
Penetration at 25°C [0.1 mm] Penetracja w 25°C [0,1 mm]	PN-EN 1426	35-50	43
Softening point [°C] Temperatura mięknięcia [°C]	PN-EN 1427	50-58	55.1
Breaking point [°C] Temperatura łamliwości wg Fraassa [°C]	PN-EN 12593	≤ -5	-13
Retained penetration after ageing RTFOT [%] Pozostała penetracja po starzeniu RTFOT [%]	PN-EN 1426 PN-EN 12607-1	≥ 53	73.6
Increase of softening point after ageing RTFOT [°C] Wzrost temperatury mięknięcia po starzeniu RTFOT [°C]	PN-EN 1427 PN-EN 12607-1	≤ 8	6.6
Density at 25°C [kg/m ³] Gęstość w 25°C [kg/m ³]	PN-EN 15326	n/a ^{*)} nd. ^{*)}	1020
Natural asphalt TLA / Asfalt naturalny TLA			
Property according to [32] Właściwość wg [32]	Metoda badania Test method	Requirements according to [32] Wymagania wg [32]	Test Result Wynik badania
Penetration at 25°C [0.1 mm] Penetracja w 25°C [0,1 mm]	PN-EN 1426	0-4	4
Softening point [°C] Temperatura mięknięcia [°C]	PN-EN 1427	93-99	101.2
Solubility in toluene [% (m/m)] Rozpuszczalność w toluenie [% (m/m)]	PN-EN 12592	52-55	57.6
Density at 25°C [kg/m ³] Gęstość w 25°C [kg/m ³]	EN ISO 3838	1390-1420	1380
Ash content by mass [% (m/m)] Zawartość części stałych [% (m/m)]	EN ISO 1426	35-39 ^{**)} 15-17 ^{**)}	not tested nie badano
*) No requirements for this property / Brak wymagań dla danej właściwości			
**) Ranges for medium and high ash content, respectively / Odpowiednio dla średniej i wysokiej zawartości cząstek stałych			
n/a – not applicable, nd. – nie dotyczy			

Jako wypełniacz zastosowano mączkę wapienną, wyprodukowaną według wymagań technicznych WT-1:2014 [33] oraz normy PN-EN 13043:2004 [34]. Do badań mastyksów wykorzystano frakcję < 0,063 mm odsianą z mączki wapiennej, ponieważ stosowaną w dalszej części pracy wartość *w/l* przyjęto jako stosunek wagowy zawartości ziaren przechodzących przez sito 0,063 mm do całkowitej zawartości lepiszcza w mieszance. Gęstość wypełniacza wynosiła 2,07 Mg/m³, a zawartość wolnych przestrzeni w stanie suchym i zagęszczonym była 31%. Do wykonania mieszanki MA zastosowano kruszywo granodiorytowe frakcji 0/4, 4/8 oraz 8/11 wyprodukowane zgodnie z normą PN-EN 13043:2004 [34].

Limestone powder, produced in accordance with the Polish technical requirements WT-1:2014 [33] and the PN-EN 13043:2004 [34] standard, was used as filler. The fraction of < 0.063 mm was sieved from the limestone powder and used in mastic testing, since the filler-bitumen ratio assumed in this research is the proportion by weight of particles passing through 0.063 mm sieve to the total binder weight in the mixture. The density of the filler equaled 2.07 Mg/m³, and its air void content in dry and compacted state: 31%. Granodiorite aggregate of fractions 0/4, 4/8 and 8/11, produced in accordance with the PN-EN 13043:2004 [34] standard, was used during the production of the mastic asphalt mixture.

3. METODYKA BADAŃ

3.1. LEPI SZCZ E

Aby modyfikacja lepiszcza była optymalna i skuteczna, konieczne jest m.in. dodanie ściśle określonej ilości modyfikatora do asfaltu drogowego. W celu ustalenia optymalnego dodatku asfaltu naturalnego, w badaniach własnych bazowy asfalt 35/50 został poddany modyfikacji dodatkiem asfaltu naturalnego TLA w ilości od 0% do 20% (w stosunku do masy asfaltu bazowego), z krokiem 10%. Takie proporcje dodatku asfaltu naturalnego przyjęto na podstawie publikacji [35] oraz wstępnych badań własnych [36]. Wynika z nich, że przy 10% kroku zmiany ilości dodatku TLA zachodzi zauważalna różnica właściwości finalnego lepiszcza, zaś dodatek ponad 20% zbyt mocno usztywnia lepiszcze, co może mieć ujemny wpływ na zachowanie asfaltu lanego w niskich temperaturach [37]. Wyniki badań podstawowych właściwości asfaltu 35/50 z dodatkiem asfaltu naturalnego przedstawiono w Tabl.2. Dla każdej ilości dodatku przeprowadzono po 6 powtórzeń. Przed opracowaniem wyników odrzucono za pomocą testu Grubbsa wartości odstające, niepewności pomiarowe oszacowano metodą A – na podstawie analizy statystycznej serii pomiarów.

Table 2. Test results of basic properties of the analyzed binders

Tablica 2. Wyniki badań podstawowych właściwości analizowanych lepiszczy

Binder Lepiszcz e	Penetration at 25°C [0.1 mm] Penetracja w 25°C [0,1 mm]	Softening point [°C] Temperatura mięknienia [°C]
35/50	43.1 ± 1.0	55.1 ± 0.6
35/50 + 10% TLA	39.9 ± 1.2	56.9 ± 0.5
35/50 + 20% TLA	31.8 ± 1.9	59.3 ± 0.2
TLA	4.0 ± 0.2	101.1 ± 0.2

Przygotowanie lepiszcza do badań przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12594:2007 [38]. Próbkę asfaltu 35/50 ogrzewano w temperaturze 150-160°C przez co najmniej pół godziny, do momentu jej upłynięcia. Do roztopionego lepiszcza dodawano odmierzoną ilość dodatku TLA. Następnie próbka poddawana była wygrzewaniu przez jedną godzinę. Po tym czasie próbka była ujednorodniana poprzez mieszanie mieszadłem wysokoobrotowym przez 5 minut.

3.2. MASTYKS ASFALTOWY

Skład mastyksu, tj. proporcje wypełniacz/lepiszcze *w/l* ustalono na podstawie ramowych składów mieszanek asfaltu lanego wg normy PN-S-96025 [39], ponieważ w nowszych wytycznych WT-2:2014 [40] nie podano maksymalnej zawartości

3. TEST METHODOLOGY

3.1. BINDER

In order to achieve an effective and optimum modification, it is necessary to precisely establish the quantity of the modifier dosed into the road asphalt. In order to determine the optimum addition of the natural asphalt in the research, the base 35/50 bitumen was modified with TLA quantities from 0% to 20% (relative to the weight of the base bitumen), with a step of 10%. Such proportions of natural asphalt to base asphalt were assumed based on the publication [35] and own preliminary tests [36], which implied that a 10% step in the quantity of TLA results in a noticeable difference in the properties of the final binder. Addition of more than 20% leads to excessive stiffness of the binder, which may negatively affect the low-temperature performance of the obtained mastic asphalt mixture [37]. The results obtained for basic properties of the 35/50 bitumen with addition of natural asphalt are presented in Table 2. For each quantity of the additive, 6 test measurements were performed. Before further processing of the results, outliers were excluded using the Grubbs test and measurement uncertainties were evaluated using the A method – based on statistical analysis of a series of repeated measurements.

The binder was prepared for testing according to the PN-EN 12594:2007 [38] standard. A sample of 35/50 bitumen was heated at the temperature of 150-160°C for at least half an hour, until its liquefaction. The TLA additive was dosed subsequently into the binder. The specimen was subjected to further heating for an hour. Afterwards, in order to ensure homogeneity, it was mixed with a high-speed mixer for 5 minutes.

3.2. MASTIC

The composition of the mastic, i.e. its filler-binder ratio, was determined based on the typical compositions of mastic asphalt mixtures given in the PN-S-96025 [39] standard, since the newer requirements WT-2:2014 [40] do not include information on the maximum binder content in a MA mixture. The choice of the filler-binder proportion was also based on the definition formulated by Judycki, who recommended assuming the filler-binder ratio as the proportion by weight of the particles passing through the 0.063 mm sieve to the total binder content in the mixture [24]. Finally, the filler-binder ratio values assumed for the research ranged from 2.0 to 4.0, with a step of 0.4. Since the TLA natural binder is a mixture of bitumen and fine mineral particles, the quantity of the added filler (limestone powder) was decreased by the quantity of mineral

lepiszczą w mieszance MA. W doborze stosunku w/l skorzystano także z definicji Judyckiego, który zaleca przyjmować wartość w/l jako stosunek wagowy zawartości ziaren przechodzących przez sito 0,063 mm do całkowitej zawartości lepiszcza w mieszance [24]. Ostatecznie do badań przyjęto wartości w/l z przedziału od 2,0 do 4,0 z krokiem 0,4. Ponieważ asfalt naturalny TLA stanowi mieszaninę lepiszcza oraz drobnych cząstek mineralnych, ilość dodanego wypełniacza (mączki wapiennej) pomniejszono o ilość cząstek mineralnych pochodzących z asfaltu naturalnego (Tabl. 1), wzorując się na poradniku Laborhandbuch für Trinidad Naturasphalt [41].

Próbki mastyksu przygotowano, ogrzewając wypełniacz przez 3 godziny w suszarce w temperaturze 180°C oraz ogrzewając lepiszcze asfaltowe przez 1 godzinę w temperaturze 160°C. Następnie mieszano wypełniacz z lepiszczem do uzyskania jednolitej masy i zalewano nią wcześniej wygrzane formy. Po pół godzinie chłodzenia próbek w temperaturze pokojowej ścinano nadmiar mastyksu i kondycjonowano próbki przez 1,5 godziny w wodzie o temperaturze 25°C. Po upływie tego czasu próbki poddawane były badaniu. Dla każdej kombinacji w/l oraz ilości dodatku TLA przeprowadzono po 9 powtórzeń. Przed opracowaniem wyników odrzucono za pomocą testu Grubbsa wyniki odstające, niepewności pomiarowe oszacowano metodą A – na podstawie analizy statystycznej serii pomiarów.

Pod względem reologicznym mastyks asfaltowy można uważać za lepiszcze o bardzo dużej lepkości, stąd też do oceny właściwości mastyksu zastosowano badanie metodą rozciągania z pomiarem siły w duktylometrze, zgodnie z normą PN-EN 13589:2011 [42], stosowane dla modyfikowanych lepiszczy asfaltowych [22]. Polega ona na rozciąganiu próbki w określonych warunkach (prędkość rozciągania 50 mm/min), z jednoczesnym pomiarem siły rozciągającej i rejestracją przemieszczenia. Badanie było prowadzone w temperaturze 25°C do momentu zniszczenia próbki. Przykładowy wykres zależności siły rozciągającej od przemieszczenia przedstawiono na Rys. 1 [22, 43].

Wykres na Rys. 1 przedstawia następujące charakterystyczne parametry: siłę maksymalną F_{\max} , maksymalne wydłużenie L_{\max} , umowną energię odkształcenia W_{odk} , umowną energię sprężystości W_{spr} , umowną energię plastyczności W_{plast} oraz punkt przegięcia krzywej ciągliwości. Umowna energia odkształcenia W_{odk} odpowiada energii, jaką należy włożyć w rozciągnięcie próbki do osiągnięcia określonego wydłużenia. Wartość umownej energii odkształcenia W_{odk} odpowiada polu pod wykresem krzywej rozciągania. Na Rys. 1 jest to suma pól $E_1 + E_2 + E_3$. Umowna energia sprężystości W_{spr}

particles coming from the natural asphalt (Table 1), following the approach described in the handbook Laborhandbuch für Trinidad Naturasphalt [41].

During mastic specimen preparation, the filler was heated for 3 hours in a dryer at 180°C and the binder was heated for 1 hour at 160°C. Afterwards the filler and binder were mixed until a homogeneous mass was obtained. It was poured into preheated molds. After half an hour of cooling at room temperature the excess of mastic was cut and the specimens were conditioned for further 1.5 hour at the temperature of 25°C. Subsequently, the specimens were subjected to testing. For each combination of filler-binder ratio and TLA quantity, 9 test measurements were performed. Before further processing of the results, outliers were excluded using the Grubbs test and measurement uncertainties were evaluated using the A method – based on statistical analysis of a series of repeated measurements.

With regard to rheology, mastic may be considered as if it were a binder with very high viscosity, therefore its tensile properties were assessed using the force ductility method according to the PN-EN 13589:2011 [42] standard, typically applied to modified bituminous binders [22]. The test consists in subjecting the specimen to tension in defined conditions (at the rate of 50 mm/min), with ongoing measurement of tensile force and displacement. The test was performed at the temperature of 25°C until specimen failure. An example plot of tensile force vs. displacement is presented in Fig. 1 [22, 43].

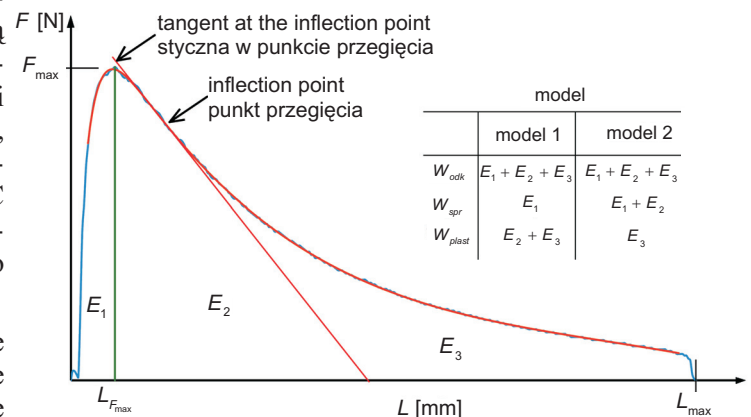


Fig. 1. Example graph of ductility curve with force measurement for a sample with constant cross-section [22] (explanation of descriptions in the text)

Rys. 1. Przykładowy wykres krzywej ciągliwości z pomiarem siły dla próbki o stałym przekroju [22] (objaśnienie opisów w tekście)

odpowiada za odkształcenia sprężyste powstałe pod wpływem rozciągania próbki (na Rys. 1 jest oznaczona symbolem E_1), natomiast umowna energia plastyczności W_{plast} charakteryzuje pełzanie plastyczne. Energię plastyczności W_{plast} określamy jako różnicę umownej energii odkształcenia W_{odk} i umownej energii sprężystości W_{spr} .

W przypadku określenia umownej energii sprężystości W_{spr} możemy zastosować dwa sposoby jej wyznaczenia – według modelu 1 lub 2 (Rys. 1). Sposób pierwszy, najprostszy, zakłada, że umowna energia sprężystości W_{spr} odpowiada polu pod wykresem od wartości siły równej 0 do wartości maksymalnej F_{max} . Na Rys. 1 odpowiada zatem polu E_1 . Sposób drugi, dokładniejszy, został opracowany na podstawie modelu Burgersa [22]. Model ten posługuje się następującymi parametrami: moduł sprężystości natychmiastowej, moduł sprężystości opóźnionej, współczynnik lepkości, współczynnik lepkości opóźnienia sprężystego. Wówczas umowna energia sprężystości odpowiada sumie pól $E_1 + E_2$, ograniczonej krzywą rozciągania od wartości siły $F = 0$ do wartości maksymalnej F_{max} , następnie krzywą do punktu przegięcia (styczności) i wreszcie styczną do wykresu krzywej ciągłości w punkcie przegięcia. W opracowaniu wyników badań autorzy zastosowali model pierwszy.

Umowna energia plastyczności W_{plast} charakteryzuje właściwości sprężyste lepiszcza oraz jego zdolność do przeciwdziałania deformacjom pod wpływem obciążenia zmiennego, natomiast umowna energia odkształcenia W_{odk} określa siłę łączącą lepiszcze z kruszywem (kohezję mieszanki). Większa umowna energia odkształcenia W_{odk} oznacza zwiększenie odporności mieszanki na spękania [44-47]. Umowna energia sprężystości W_{spr} jest z kolei wskaźnikiem odporności lepiszcza na spękania zmęczeniowe. Zarówno asfalty z małą umowną energią sprężystości W_{spr} , jak i te z małą umowną energią plastyczności W_{plast} , nie są odpowiednie do zastosowania w mieszankach mineralno-asfaltowych z uwagi na możliwość powstania spękań zmęczeniowych [48]. Parametry uzyskiwane w badaniu siły rozciągającej w duktylometrze z pomiarem siły – energia odkształcenia W_{odk} , maksymalna siła rozciągająca F_{max} i maksymalne wydłużenie L_{max} – są jednymi z najlepszych parametrów do oceny kohezji lepiszczy asfaltowych [22].

3.3. MIESZANKA ASFALTU LANEGO MA

Badania przeprowadzono na asfalcie lanym MA 11 przeznaczonym dla kategorii ruchu KR 3-7 i stosowanym najczęściej w nawierzchniach obiektów mostowych [6-8]. Krzywą uziarnienia mieszanki MA 11 pokazano na Rys. 2.

Do badań przygotowano trzy mieszanki MA 11, w których zastosowano mastyks o stosunku wypełniacza do lepiszcza w/l

The plot in Fig. 1. shows the following characteristic information: maximum force F_{max} , maximum elongation L_{max} , conventional toughness energy W_{odk} , conventional elasticity energy W_{spr} , conventional tenacity energy W_{plast} and the inflection point of the ductility curve. The conventional toughness energy W_{odk} is the energy that has to be spent in order to stretch the specimen to particular elongation. Its value is represented by the area under the ductility curve. In Fig. 1 it is the sum of the areas $E_1 + E_2 + E_3$. The conventional elasticity energy W_{spr} is associated with elastic strain resulting from tension (in Fig. 1 it is labelled as E_1), whereas the conventional tenacity energy characterizes the plastic creep. The tenacity energy W_{plast} may be determined as the difference between the conventional toughness energy W_{odk} and the conventional elasticity energy W_{spr} .

The conventional elasticity energy W_{spr} may be defined according to two possible approaches – model 1 or 2 (Fig. 1). The first model simply assumes that the conventional elasticity energy W_{spr} is represented by the area under the section of the plot ranging from force equal to 0 to the maximum force value F_{max} . Therefore, it is equal to the E_1 area in Fig. 1. The second, more precise model was developed based on the Burgers model [22], which uses the following parameters: instantaneous elasticity modulus, delayed elasticity modulus, viscosity coefficient and viscosity coefficient of elastic delay. In this case the conventional elasticity energy W_{spr} is represented by the sum of the areas $E_1 + E_2$, limited first by the ductility curve from $F = 0$ up to the inflection point of the curve and then by the tangent to the curve at the inflection point. In the analyses of the obtained results, the authors used the first model.

The conventional tenacity energy W_{plast} characterizes the elastic properties of the binder and its ability to prevent deformation under variable load, while the conventional toughness energy W_{odk} reflects the bond between the binder and the aggregate (mixture cohesion). Higher conventional toughness energy W_{odk} indicates greater cracking resistance of the mixture [44-47]. The conventional elasticity energy W_{spr} is an indicator of resistance of the binder to fatigue cracking. Neither binders with low conventional elasticity energy W_{spr} nor those with low conventional tenacity energy W_{plast} are appropriate for use in asphalt mixtures due to the possibility of occurrence of fatigue cracks [48]. Parameters obtained from the force ductility test – the conventional toughness energy W_{odk} , the maximum tensile force F_{max} and the maximum elongation L_{max} – belong to the best parameters used for the purpose of assessment of bituminous binder cohesion [22].

równym 3,2; 3,6 i 4,0. Wybór takich proporcji składników mastyksu był uzasadniony dostosowaniem się do wymagań wytycznych WT-2 [40] w zakresie minimalnej zawartości lepiszcza w asfalcie lanym oraz zawartości maksymalnej, gwarantującej uzyskanie odpowiedniej jakości tej mieszanki. Wartości te obejmują ilość lepiszcza od wartości bliskiej zawartości minimalnej B_{\min} (tj. od 7,0%) do wartości 8,7%. Większa zawartość lepiszcza skutkowałą otrzymaniem bardzo miękkiej mieszanki, o penetracji powyżej 15 mm.

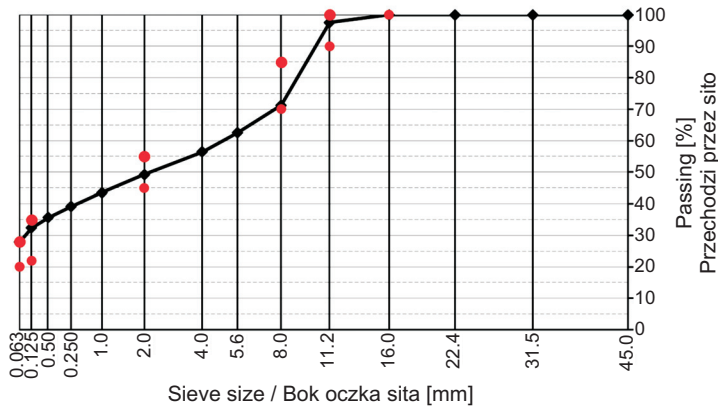


Fig. 2. Grading curve of MA 11 mixture

Rys. 2. Krzywa uziarnienia mieszanki MA 11

Do oceny odporności asfaltu lanego MA 11 na odkształcenia trwale zastosowano metody penetracji stemplem statycznym i dynamicznym. Próbkę w obu przypadkach formowano w temperaturze 220°C. Badanie penetracji stemplem statycznym wykonano zgodnie z PN-EN 12697-20 [49] na kostkach sześciennych o boku 70,7 mm. Penetrometr użyty do badania pozwala na przyłożenie początkowego obciążenia o wartości 25 N, następnie po 10 minutach dodatkowego obciążenia 500 N, dającego łączne obciążenie 525 N. Obciążenie było przekazywane na próbkę przez okrągły trzpień o powierzchni 500 mm². Próbkę w trakcie badania była przetrzymywana w kąpielii wodnej o temperaturze 40°C. Jako wynik badania przyjęto zagłębienie trzpienia po 30 minutach oraz przyrost zagłębienia trzpienia po kolejnych 30 minutach. Badanie penetracji stemplem dynamicznym przeprowadzono zgodnie z normami PN-EN 12697-25 [50] oraz PN-EN 13108-20 [51], w temperaturze 50°C, na próbkach walcowych o średnicy 150 mm i wysokości ok. 60 mm. Przed badaniem dynamicznego zagłębienia stempla próbki sezonowano przez 4 godziny w temperaturze badania, a następnie poddano wstępnemu obciążeniu statycznemu 10 kPa. Obciążenie przykładane jest poprzez stalowy cylinder o powierzchni 2500 mm² (średnica stempla 56,4 mm), w sposób cykliczny, przy następujących parametrach:

3.3. MASTIC ASPHALT MIXTURE MA

The tests were performed on mastic asphalt MA 11 mixture, suitable for the higher traffic categories KR 3-7 and most often applied in bridge pavements [6-8]. The grading curve of MA 11 is presented in Fig. 2.

The three MA 11 mixes prepared for testing included mastic with the filler-binder ratios of 3.2, 3.6 and 4.0. Choice of such proportions was based on the requirements set in the WT-2 document [40] regarding both the minimum binder content in mastic asphalt and the maximum content that still provides satisfactory quality of the mixture. The binder content ranged from values close to the minimum content B_{\min} (i.e. from 7.0%) to the value of 8.7%. Greater binder content led to production of very soft mixture with indentation results over 15 mm.

The permanent deformation resistance of mastic asphalt MA 11 mixtures was evaluated using static and dynamic indentation methods. In both cases specimens were formed at the temperature of 220°C. Static indentation was tested according to the PN-EN 12697-20 standard [49], using cubic specimens with 70.7 mm edges. The used penetrometer enabled applying the initial loading of 25 N and then, after 10 minutes of preloading, increasing the load by 500 N, thus giving the total test load of 525 N. The load was transferred onto specimens through a cylindrical piston with contact surface area of 500 mm². During the test, the specimen remained submerged in water at 40°C. The values registered as the results of the test included indentation of the piston after 30 minutes and the increase in the indentation after additional 30 minutes of constant load. Testing of dynamic indentation was performed according to the PN-EN 12697-25 [50] and PN-EN 13108-20 [51] standards, at the temperature of 50°C, on cylindrical specimens with diameter of 150 mm and height of 60 mm. Before the dynamic testing, the specimens were conditioned for 4 hours at the target test temperature, and then preloaded with static load of 10 kPa. The load was transferred through a steel cylinder with bottom surface area of 2500 mm² (flat-ended base diameter of 56.4 mm), in a cyclic manner, with the following parameters:

- maximum load value: 0.875 kN (corresponding to specimen load of 0.35 N/mm²),
- minimum load value: 0.2 kN (corresponding to specimen load of 0.08 N/mm²),
- load time: 0.2 s,
- rest time: 1.5 s,

- wartość maksymalna obciążenia: 0,875 kN (odpowiada to obciążeniu próbki 0,35 N/mm²),
- wartość minimalna obciążenia: 0,2 kN (odpowiada to obciążeniu próbki 0,08 N/mm²),
- czas trwania obciążenia: 0,2 s,
- czas odpoczynku: 1,5 s,
- czas trwania cyklu: 1,7 s,
- kształt krzywej obciążenia: półsinusoidea.

Kolejne wyniki odczytywano po 2500 i 5000 cykli obciążenia dynamicznego. Zagłębienie trzpienia w próbce przyjmowano jako średnią z trzech wartości przemieszczeń: dwóch z czujników LVDT opartych na płycie przymocowanej do stępła oraz jednej z czujnika przemieszczenia siłownika.

W badaniu penetracji stemplem statycznym i dynamicznym dla każdej kombinacji w/l i ilości dodatku TLA przeprowadzono po 6 powtórzeń. Podobnie jak po badaniach lepiszcza i mastyksu, przed opracowaniem wyników również odrzucono za pomocą testu Grubbsa wyniki odstające, niepewności pomiarowe oszacowano metodą A – na podstawie analizy statystycznej serii pomiarów.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. BADANIA MASTYKSU

Na Rys. 3-5 przedstawiono wartości uzyskanej w badaniach umownej energii odkształcenia W_{odk} , umownej energii sprężystości W_{spr} oraz umownej energii plastyczności W_{plast} w zależności od ilości dodatku TLA w lepiszczu (% m/m) oraz stosunku w/l w mastyksie. Umowna energia sprężystości W_{spr} została obliczona za pomocą sposobu pierwszego.

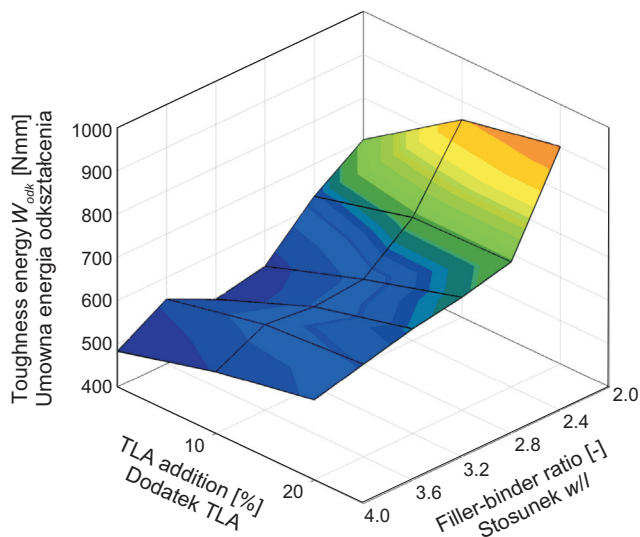


Fig. 3. Results of toughness energy W_{odk}
Rys. 3. Wyniki badania umownej energii odkształcenia W_{odk}

- duration of the cycle: 1.7 s,
- shape of the loading curve: half-sine.

The results were registered after 2500 and 5000 cycles of dynamic loading. The indentation of the piston into the specimen was determined as the average of three displacement values: two from LVDT sensors placed on a plate mounted on the cylinder and one from the displacement sensor of the piston itself.

In the static and dynamic indentation tests, 6 test measurements were performed for each combination of filler-binder ratio and TLA quantity. Like with binder and mastic test results, before their further processing outliers were excluded using the Grubbs test and measurement uncertainties were evaluated using the A method – based on statistical analysis of a series of repeated measurements.

4. TEST RESULTS

4.1. TESTING OF MASTIC

Figs 3-5 present the obtained values of conventional toughness energy W_{odk} , conventional elasticity energy W_{spr} and conventional tenacity energy W_{plast} , depending on the quantity of TLA additive in the binder (% m/m) and the filler-bitumen ratio of the mastic. The conventional elasticity energy W_{spr} was calculated using the aforementioned model 1.

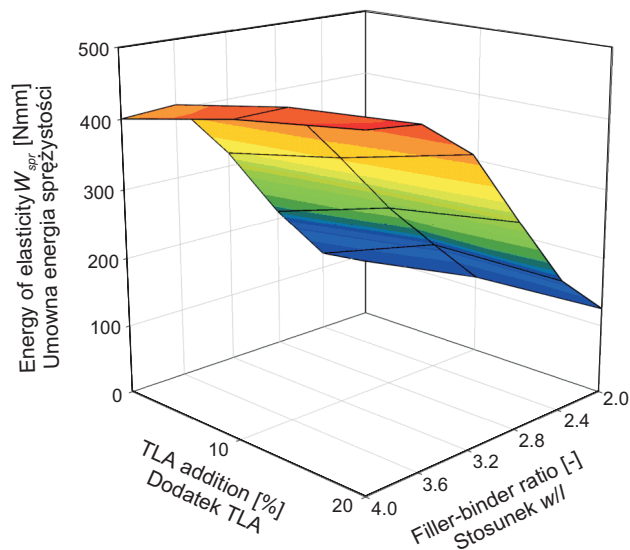


Fig. 4. Results of energy of elasticity W_{spr}
Rys. 4. Wyniki badania umownej energii sprężystości W_{spr}

Wzrost umownej energii odkształcenia W_{odk} wraz ze zwiększeniem dodatku TLA świadczy o zwiększonej kohezji mastyksu. Umowna energia odkształcenia dla asfaltu bez dodatku TLA oraz z 10% dodatkiem początkowo maleje wraz ze wzrostem w/l do wartości około 3,0 a następnie wzrasta, aby przy stosunku $w/l = 3,6$ osiągnąć punkt przegięcia i ponownie zmniejszyć swoją wartość. Natomiast dla 20% ilości dodatku TLA zaobserwowano ciągły spadek wartości umownej energii odkształcenia W_{odk} . Zmniejszenie umownej energii odkształcenia W_{odk} może wpłynąć na zmniejszenie odporności mieszanki na deformacje trwałe. Mastyks asfaltowy staje się „suchy”, przez co maleje kohezja mieszanki oraz zwiększa się podatność mieszanki na spękania zmęczeniowe [48].

W przypadku umownej energii sprężystości W_{spr} można zauważyć jej wzrost wraz ze zwiększaniem się stosunku w/l do poziomu 3,6. Przy tym poziomie w/l wartość energii sprężystości stabilizuje się. Wzrost ilości dodatku TLA także powoduje zwiększenie W_{spr} (max. dla 20% TLA), przy czym trend ten jest wyraźniejszy dla mniejszych stosunków w/l . W przypadku umownej energii plastyczności W_{plast} zaobserwowano stały jej spadek wraz ze zwiększaniem się stosunku w/l oraz nieznaczny wzrost wraz ze zwiększającą się zawartością TLA. Udział umownej energii sprężystości W_{spr} w stosunku do umownej energii plastyczności W_{spr} rośnie wraz ze zwiększaniem się stosunku w/l . Przy stosunku w/l równym ok. 2,9 umowna energia sprężystości W_{spr} zaczyna dominować nad umowną energią plastyczności W_{plast} . Zmienia się przez to charakter mastyksu – wraz ze zwiększaniem się stosunku w/l mastyks staje się bardziej sztywny, kruchy i mniej plastyczny.

4.2. BADANIA ASFALTU LANEGO

Na Rys. 6 przedstawiono wyniki badania penetracji statycznej I oraz przyrostu penetracji statycznej I_{nc} mieszanki MA 11 w zależności od ilości dodatku asfaltu naturalnego w lepiszczu (w % m/m) oraz składu mastyksu, tj. stosunku w/l . Natomiast na Rys. 7 przedstawiono wyniki badania penetracji dynamicznej ET i jej przyrostu ΔET dla tej samej mieszanki MA 11 i w zależności od tych samych zmiennych.

Na podstawie przeprowadzonych badań penetracji statycznej I stwierdzono, że dodatek asfaltu naturalnego oraz wzrost stosunku w/l powoduje zwiększenie twardości (oraz odporności na odkształcenia trwałe) asfaltu lanego MA 11. Jednakże oceniając mieszankę na podstawie przyrostu penetracji I_{nc} można zauważyć różne jej zachowanie. Dla stosunków w/l równych 3,2 i 3,6 następuje zwiększenie przyrostu penetracji I_{nc} wraz ze wzrostem ilości dodatku TLA, natomiast dla stosunku w/l równego 4,0 następuje spadek, a następnie stabilizacja przyrostu penetracji I_{nc} dla zwiększającej się ilości asfaltu naturalnego. Wynika z tego, że optymalną ilością dodatku TLA jest 10%.

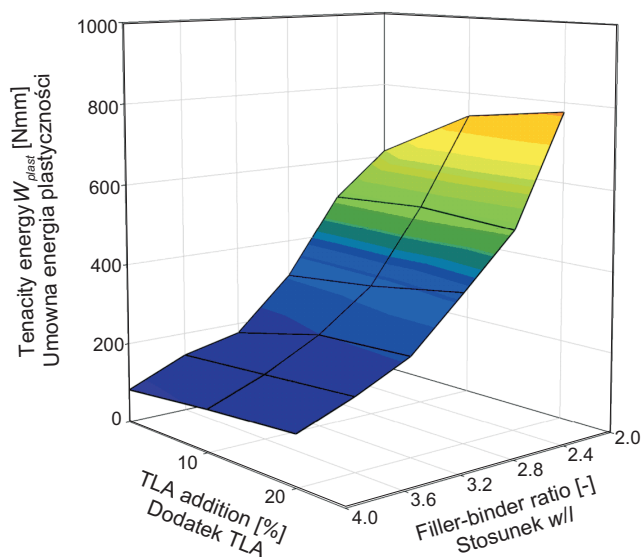


Fig. 5. Results of tenacity energy W_{plast}
Rys. 5. Wyniki badania umownej energii plastyczności W_{plast}

The increase in conventional toughness energy W_{odk} observed with an increase in the quantity of the TLA additive is a sign of increased cohesion of the mastic. The conventional toughness energy for binders without TLA and with 10% TLA addition initially decreases with an increase in the filler-binder ratio; then it increases for filler-binder ratios between approx. 3.0 to 3.6, to reach a next inflection point and start decreasing again. For 20% of TLA additive, the toughness energy W_{odk} as a function of filler-binder ratio is entirely decreasing. A decrease in conventional toughness energy W_{odk} may negatively affect the resistance of the mix to permanent deformation. The mastic becomes “dry”, which translates into lower mixture cohesion and greater susceptibility of the mixture to fatigue cracks [48].

In the case of the conventional elasticity energy W_{spr} , an increase may be observed with an increase in filler-binder ratio up to 3.6. On that level of the ratio the value of elasticity energy stabilizes. An increase in the quantity of TLA additive also results in an increase in W_{spr} (max. for 20% TLA), however this trend is more pronounced for lower filler-binder ratios. For conventional tenacity energy W_{plast} , a monotonic decrease is visible with an increase in filler-binder ratio; the energy increases slightly with an increase in TLA content. The proportion of conventional elasticity energy W_{spr} to conventional tenacity energy W_{plast} increases with an increase in the filler-binder ratio. At the filler-binder ratio equal to 2.9, the conventional elasticity energy W_{spr} begins to dominate over the conventional tenacity energy W_{plast} . It reflects a change in the

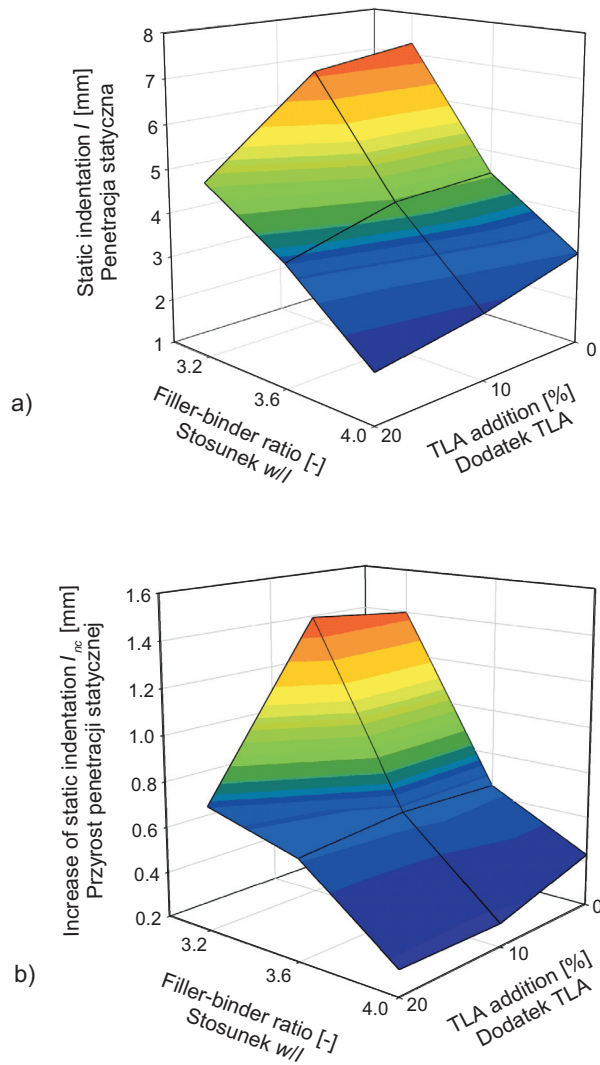


Fig. 6. Results of static indentation I [mm] (a) and increase of the static indentation I_{nc} [mm] (b) of the mastic asphalt mixture Rys. 6. Wyniki badania penetracji statycznej I [mm] (a) oraz przyrostu penetracji statycznej I_{nc} [mm] (b) asfaltu lanego

Wnioski z badań penetracji dynamicznej są podobne jak w przypadku badania penetracji stemplem statycznym – zwiększenie ilości dodatku TLA lub zwiększenie wartości stosunku w/l w mieszance powoduje wzrost odporności mieszanki na deformacje trwałe. W przypadku przyrostu penetracji wraz ze zwiększeniem stosunku w/l następuje zmniejszenie przyrostu penetracji dla danego lepiszcza. Natomiast przy stałym stosunku w/l następuje spadek przyrostu penetracji (dla 10% dodatku TLA), a następnie niewielki wzrost wartości przyrostu penetracji. Nie przekracza on jednak wartości dla lepiszcza bez tego dodatku.

character of the mastic – as the filler-binder ratio increases, the mastic becomes stiffer, more brittle and less plastic.

4.2. TESTING OF MASTIC ASPHALT MIXTURE

Fig. 6 presents the results of static indentation I and the increase in static indentation I_{nc} of the MA 11 mixture, depending on the quantity of natural asphalt in the binder (in % m/m) and the composition (filler-binder ratio) of the mastic. Fig. 7 presents the results of dynamic indentation ET and its increase ΔET for the same MA 11 mixture and the same variables.

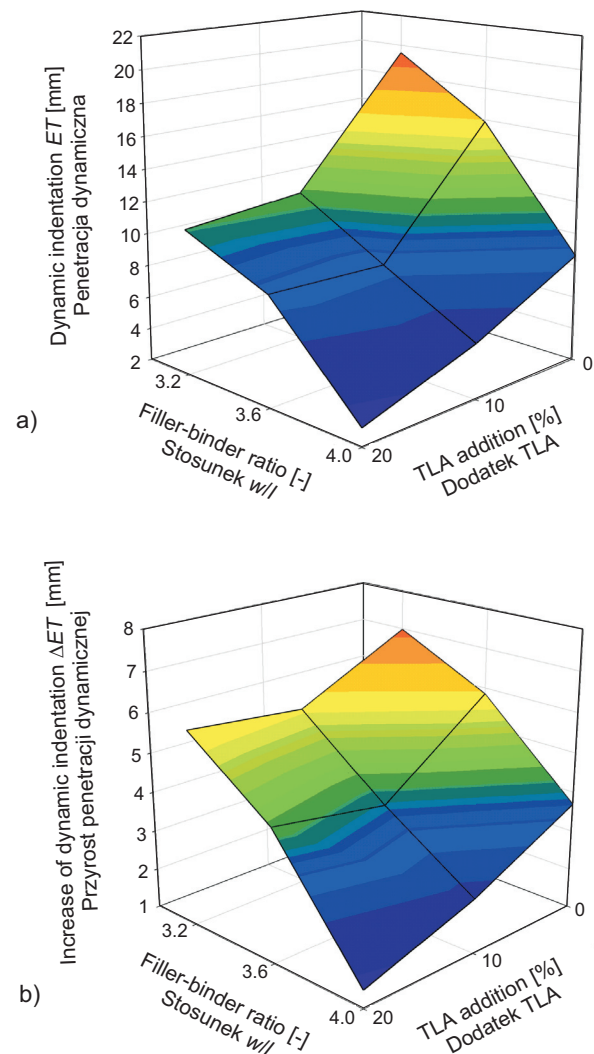


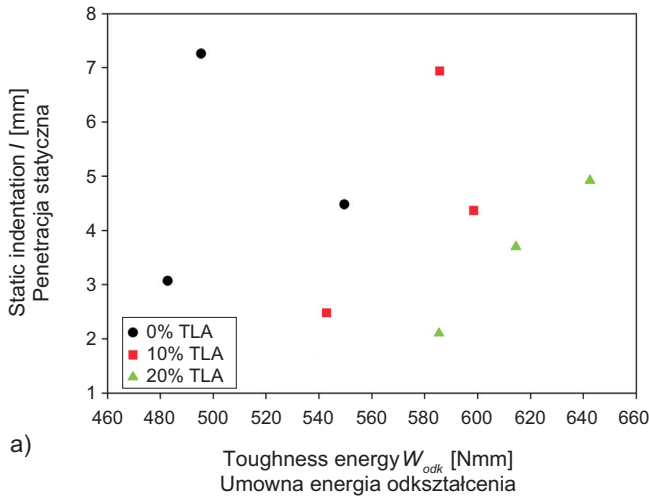
Fig. 7. Results of dynamic indentation ET [mm] (a) and increase of dynamic indentation ΔET [mm] (b) of the mastic asphalt mixture Rys. 7. Wyniki badania penetracji dynamicznej ET [mm] (a) oraz przyrostu penetracji dynamicznej ΔET [mm] (b) asfaltu lanego

5. DYSKUSJA WYNIKÓW

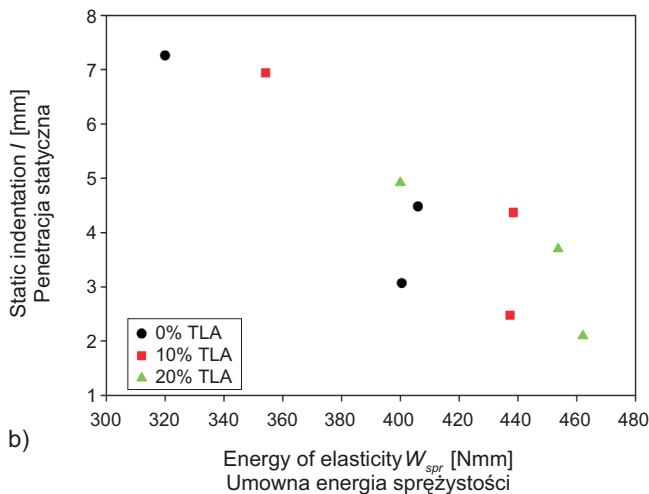
Głównym celem przeprowadzonych badań było wyznaczenie zależności pomiędzy rodzajem i wielkością umownej energii przy rozciąganiu mastyksu a odpornością na deformacje trwałe asfaltu lanego, mierzonej wartością penetracji statycznej i dynamicznej. Na Rys. 8-9 przedstawiono zależność penetracji statycznej asfaltu lanego od umownej energii odkształcenia W_{odk} , umownej energii sprężystości W_{spr} i umownej energii plastyczności W_{plast} mastyksu, na bazie którego wykonano mieszankę MA 11. Z przedstawionych zależności wynika, że do oceny odporności na deformacje trwałe mieszanki MA 11 można wykorzystać umowną energię plastyczności mastyksu W_{plast} , niezależnie od ilości dodatku TLA. Funkcję tę można opisać równaniem liniowym:

$$l = a \cdot W_{plast} + b, \quad (1)$$

gdzie a i b to stałe wyznaczone na podstawie regresji liniowej.



a)



b)

Based on the performed tests of static indentation l , it was established that addition of natural asphalt and an increase in filler-binder ratio result in lesser indentation (and greater resistance to permanent deformation) of the MA 11 mastic asphalt mix. However, when the indentation increase I_{nc} is taken into account in the evaluation of the mixture, variable trends may be observed. For filler-binder ratios of 3.2 and 3.6 the I_{nc} value increases with an increase in the quantity of the TLA additive, whereas for the ratio of 4.0 the I_{nc} values decrease and then stabilize with an increase in TLA quantity. Such results imply that 10% is the optimum TLA quantity.

The conclusions from dynamic indentation tests are similar to those from static indentation tests – an increase in TLA quantity or filler-binder ratio results in an increase in the resistance of the mixture to permanent deformation. In the case of indentation increase ΔET , for a given binder type its value decreases with an increase in the filler-binder ratio. For a given filler-binder value, ΔET decreases (for 10% TLA) and then slightly increases with TLA quantity. However, this increase does not exceed the ΔET values for binder without TLA.

5. DISCUSSION OF TEST RESULTS

The primary aim of the tests was to determine the relationship between the type and value of conventional energy of the mastic in ductility test and the permanent deformation resistance of the mastic asphalt, measured through static and dynamic indentation values. Figs 8-9 present the relationships between static indentation of the mastic asphalt MA 11 mixture and the conventional toughness energy W_{odk} , conventional elasticity energy W_{spr} and conventional tenacity energy W_{plast} of the mastic used in the mixture. The presented relationships indicate that the resistance to permanent deformations of the MA 11 mixture may be assessed using the conventional tenacity energy W_{plast} of the mastic, regardless of the quantity of TLA added. The function may be described using a linear equation:

$$l = a \cdot W_{plast} + b, \quad (1)$$

where a and b are constants determined based on linear regression.

Fig. 8. Relationship between static indentation and toughness energy W_{odk} (a) and static indentation and energy of elasticity W_{spr} (b) for the MA 11 mixture

Rys. 8. Zależność penetracji statycznej mieszanki MA 11 od umownej energii odkształcenia mastyksu W_{odk} (a) i umownej energii sprężystości mastyksu W_{spr} (b)

W pozostałych przypadkach (umowna energia odkształcenia W_{odk} , umowna energia sprężystości W_{spr}) nie znaleziono zależności pomiędzy ww. cechami mastyksu a odpornością asfaltu lanego, mierzoną penetracją statyczną. Co więcej, w przypadku umownej energii sprężystości W_{spr} dla zbliżonych wartości tej energii otrzymano znacznie różniące się wyniki badania penetracji statycznej.

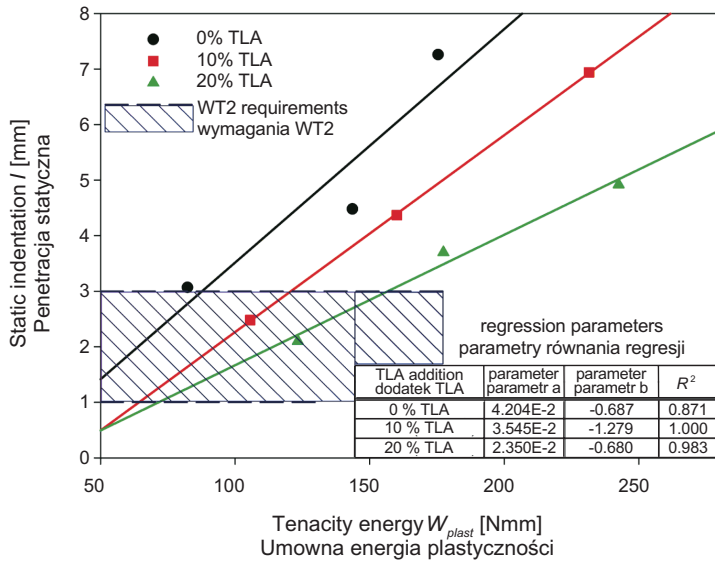


Fig. 9. Relationship between static indentation and tenacity energy W_{plast} for the MA 11 mixture
Rys. 9. Zależność penetracji statycznej mieszanki MA 11 od umownej energii plastyczności mastyksu W_{plast}

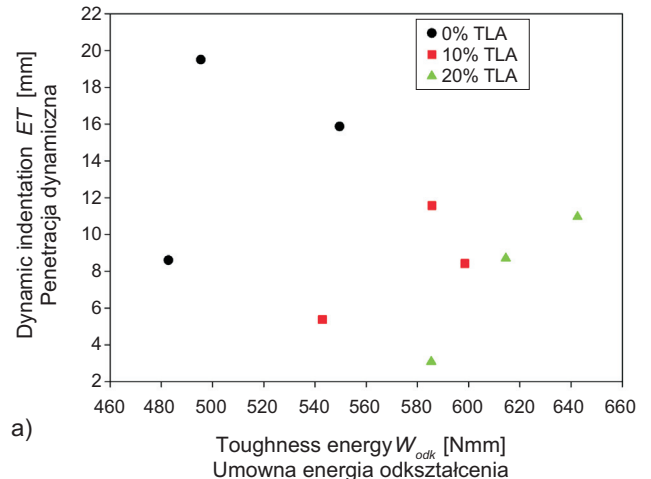
Na Rys. 10-11 przedstawiono zależność penetracji dynamicznej asfaltu lanego od umownej energii odkształcenia W_{odk} , umownej energii sprężystości W_{spr} i umownej energii plastyczności W_{plast} mastyksu, z udziałem którego wykonano mieszankę MA 11. W tym przypadku również zauważono zależność odporności na deformacje trwałe od umownej energii plastyczności W_{plast} . Warto zauważyć, że penetracja dynamiczna wykazuje większą korelację z umowną energią plastyczności W_{plast} niż penetracja stemplem statycznym. Podobnie jak w przypadku penetracji statycznej, wyniki badań penetracji metodą dynamiczną nie wykazują korelacji z umowną energią odkształcenia W_{odk} oraz energią sprężystości W_{spr} mastyksu.

Fig. 10. Relationship between dynamic indentation and toughness energy W_{odk} (a) and dynamic indentation and energy of elasticity W_{spr} (b) for the MA 11 mixture

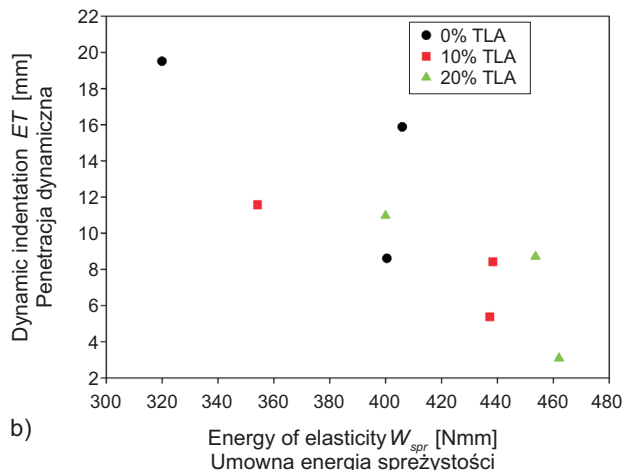
Rys. 10. Zależność penetracji dynamicznej mieszanki MA 11 od umownej energii odkształcenia mastyksu W_{odk} (a) i od umownej energii sprężystości mastyksu W_{spr} (b)

In other cases (conventional toughness energy W_{odk} and conventional elasticity energy W_{spr}) no relationships were noted between the aforementioned properties of the mastic used and the resistance of the MA mixture expressed by static indentation. Moreover, in the case of conventional elasticity energy W_{spr} , the results of static indentation obtained for similar values of W_{spr} varied significantly.

Figs 10-11 present the relationships between dynamic indentation of the MA 11 mixture and the conventional toughness energy W_{odk} , conventional elasticity energy W_{spr} and conventional tenacity energy W_{plast} of the mastic used in the mixture. In this case a relationship was noted again between the resistance to permanent deformation of the MA 11 mixture and the conventional tenacity energy W_{plast} of the mastic. It is note worthy that dynamic indentation exhibits better correlation with the conventional tenacity energy W_{plast} than static indentation. Like in the case of static indentation, the dynamic indentation test results do not show any correlations with conventional toughness energy W_{odk} or conventional elasticity energy W_{spr} .



a)



b)

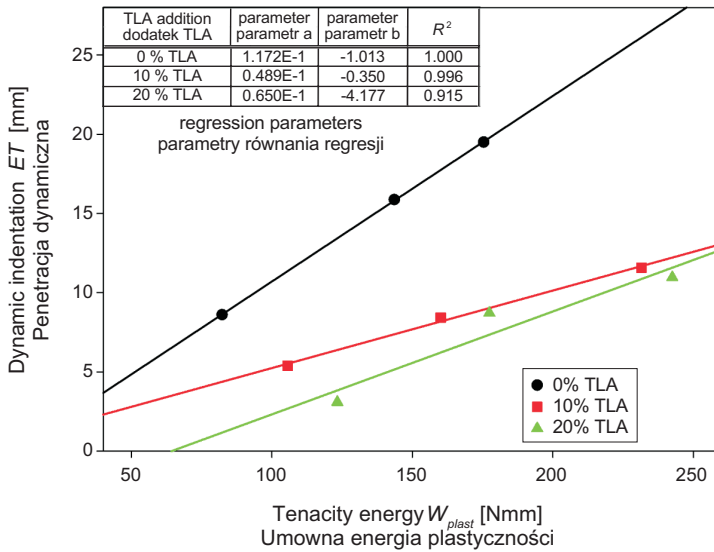


Fig. 11. Relationship between dynamic indentation and tenacity energy W_{plast} for the MA 11 mix

Rys. 11. Zależność penetracji dynamicznej mieszanki MA 11 od umownej energii plastyczności mastyksu W_{plast}

6. WNIOSKI

W artykule przedstawiono wyniki wybranych badań właściwości mastyksu oraz odporności na deformacje trwałe asfaltu lanego zawierającego ten mastyks, przy czym lepszemu był asfalt drogowy 35/50 zmodyfikowany dodatkiem asfaltu naturalnego TLA. Przeprowadzone badania wykazały dużą zależność właściwości mastyksu od właściwości jego składników oraz ich proporcji, a także wpływ właściwości mastyksu na odporność asfaltu lanego na deformacje trwałe. Analiza badań pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków jakościowych i ilościowych:

- 1) dodatek asfaltu naturalnego TLA w ilości do około 20% powoduje usztywnienie asfaltu 35/50, co wpływa na zwiększenie odporności mieszanki mineralno-asfaltowej na deformacje trwałe;
- 2) dodatek asfaltu naturalnego powoduje usztywnienie mastyksu asfaltowego, o czym świadczy wzrost energii odkształcenia wraz ze zwiększaniem zawartości TLA; optymalny wzrost umownej energii odkształcenia W_{odk} mastyksu, świadczący o jego zwiększonej kohezji, uzyskano przy stosunku $w/l = 3,6$ oraz 10% ilości dodatku TLA;
- 3) przy stosunku w/l wynoszącym około 2,9 zmienia się charakter mastyksu, tj. ze wzrostem w/l mastyks staje się bardziej sztywny;
- 4) na podstawie badań penetracji statycznej i dynamicznej stwierdzono, że dodatek asfaltu naturalnego do wartości około 10% oraz wzrost stosunku w/l powoduje zwiększenie odporności na odkształcenia trwałe;

6. CONCLUSIONS

The article presents the results of tests of chosen properties of mastic as well as tests of permanent deformation resistance of mastic asphalt mixture that contained this mastic. A 35/50 road bitumen modified with an addition of natural asphalt TLA was used as binder. The performed research has shown a strong dependence of the properties of the mastic on the properties of its ingredients, and, moreover, the influence of mastic properties on permanent deformation of the obtained mastic asphalt mixture. Analysis of the test results enabled formulation of the following qualitative and quantitative conclusions:

- 1) addition of TLA natural asphalt in quantity of up to approx. 20% results in stiffening of the 35/50 bitumen, which consequently increases the permanent deformation resistance of the asphalt mixture;
- 2) addition of natural asphalt leads to stiffening of the mastic, as shown by the increase in toughness energy with the increase in TLA quantity; the optimum increase in the conventional toughness energy W_{odk} of the mastic, indicating its increased cohesion, was obtained for filler-binder ratio of 3.6 and 10% addition of TLA;
- 3) when the filler-binder ratio exceeds 2.9, the character of the mastic changes, i.e. as the filler-binder ratio increases, the mastic becomes stiffer;
- 4) based on the static and dynamic indentation tests it was established that addition of natural asphalt of up to approx. 10% as well as an increase in filler-binder ratio leads to an increase in resistance to permanent deformation;
- 5) the resistance of the MA 11 mixture to permanent deformation, both in the case of static and dynamic indentation tests, may be assessed using the conventional tenacity energy W_{plast} of the mastic, and the correlations may be expressed using linear equations;
- 6) no correlations were observed between the resistance of the MA 11 mixture to permanent deformation and the measured values of the conventional toughness energy W_{odk} or the conventional elasticity energy W_{spr} of the mastic.

Further research will encompass the proportion of filler to coarse aggregate in the mixture, analyzed in combination with filler-binder ratio and quantity of TLA. Despite the primary influence of the mastic on permanent deformation resistance of the mixture, the role of coarse aggregate in creation of this resistance cannot be omitted. Since the addition of TLA natural asphalt makes the binder stiffer, it may also deteriorate the low-temperature properties of the

- 5) do oceny odporności na deformacje trwałe mieszanki MA 11 zarówno w przypadku badania stemplem statycznym, jak i dynamicznym można wykorzystać umowną energię plastyczności mastyksu W_{plast} , a zależność tę można opisać równaniami liniowymi;
- 6) nie stwierdzono istnienia korelacji pomiędzy umowną energią odkształcenia W_{odk} i umowną energią sprężystości W_{spr} mastyksu a odpornością na deformacje trwałe mieszanki MA 11.

Dalsze badania będą obejmowały wpływ proporcji wypełniacza do kruszywa grubego w mieszance, w połączeniu z proporcją w/l i ilością dodanego asfaltu TLA. Mimo głównego wpływu mastyksu na odporność na deformacje trwałe, nie można pominąć udziału kruszywa grubego w tworzeniu tej odporności. Dodatek asfaltu naturalnego TLA powoduje również utwardzenie lepiszczca, co może w pewnym stopniu pogorszyć właściwości niskotemperaturowe lepiszczca oraz asfaltu lanego. Dalsze badania będą uwzględniały ten aspekt.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Piłat J., Radziszewski P., Kowalski J.*: Jaka nawierzchnia, taki most. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, 4, 2007, 49-52
- [2] *Sybilski D.*: Nawierzchnie mostów drogowych. Inżynier Budownictwa, 1, 2009, 62-65
- [3] *Wojnarski R.*: Doświadczenia ze stosowaniem asfaltów twardolanych w polskim drogownictwie w latach 70. Pierwsze nawierzchnie z asfaltu twardolanego. Polskie Drogi, 4, 2014, 60-62
- [4] *Jurczak R.*: Nowoczesne nawierzchnie asfaltowe w budownictwie mostowym. Mosty, 2, 2015, 42-43
- [5] *Hering M., Ruttmar I.*: Nowoczesne nawierzchnie z asfaltu lanego na obiektach mostowych w Toruniu. Mosty, 4, 2014, 34-38
- [6] *Radziszewski P., Sarnowski M., Piłat J., Mieczkowski P., Kowalski K., Król J.*: Innovative SMA-MA mixture for bridge asphalt pavement. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Praga, 2016, 1-8
- [7] *Radziszewski P.* i in.: Rozwiązania materiałowo-technologiczne izolacji i nawierzchni obiektów mostowych. Raport końcowy, Warszawa, 2013, https://www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/p/prace-naukowo-badawcze-w-trakcie_3434/Raport%20MOSTY_2013.pdf, 10.07.2020
- [8] *Jurczak R.*: Asfalt naturalny w nawierzchniach mostowych. Mosty, 4, 2014, 30-32
- binder and mastic asphalt to some extent. The future research will address this aspect as well.
- [9] *Widyatmoko D., Elliott R., Read J.*: Development of Heavy-Duty Mastic Asphalt Bridge Surfacing, Incorporating Trinidad Lake Asphalt and Polymer Modified Binders. Road Materials and Pavement Design, 6, 4, 2005, 469-483
- [10] *Gajewski M., Horodecka R.*: Właściwości reologiczne asfaltów drogowych zmodyfikowanych asfaltem naturalnym. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 17, 2, 2018, 93-109
- [11] *Ruttmar I., Hering M.*: Renesans asfaltu lanego w Polsce? Pierwsze doświadczenia z niekonwencjonalnego projektu przy realizacji nawierzchni mostowych w Toruniu. Nawierzchnie Asfaltowe, 37, 2014, 4-11
- [12] *Li R., Wang P., Xue B., Pei J.*: Experimental study on aging properties and modification mechanism of Trinidad lake asphalt modified bitumen. Construction and Building Materials, 101, 2015, 878-883
- [13] *Piłat J., Radziszewski P.*: Nawierzchnie asfaltowe. WKŁ, Warszawa, 2010
- [14] *Luszcowski S., Wojdanowicz S.*: Nowoczesne nawierzchnie bitumiczne, WKŁ, Warszawa, 1977
- [15] *Sybilski D.*: Długowieczne nawierzchnie asfaltowe w świecie i w Polsce. Drogownictwo, 3, 2004, 79-85
- [16] *Ødegaard I., Ødegaard Y.*: Effects of Mastic Ingredients and Composition on Asphalt Mixture Properties. Norwegian University of Science and Technology, Department of civil and transport, Master thesis, 2015
- [17] *Jiménez F.P., Recasens R.M., Martínez A.*: Effect of Filler Nature and Content on the Behaviour of Bituminous Mastics. Road Materials and Pavement Design, 9, 1, 2008, 417-431
- [18] *Wang H., Al-Qadi I.L., Faheem A.F., Bahia H.U., Yang S.H., Reinke G.H.*: Effect of Mineral Filler Characteristics on Asphalt Mastic and Mixture Rutting Potential. Transportation Research Record, 2208, 1, 2011, 33-39
- [19] *Grabowski W.*: Struktura a właściwości funkcjonalne wypełniaczy mineralnych stosowanych w drogownictwie. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2007
- [20] *Mazurek G., Iwański M.*: Modelling the critical concentration of mixed filler in mastic with synthetic wax, MATEC Web of Conferences, Krynica, 262, 2019, 05008, DOI: 10.1051/mateconf/201926205008
- [21] *Huang B., Shu X., Chen X.*: Effects of mineral fillers on hot-mix asphalt laboratory-measured properties. International Journal of Pavement Engineering, 8, 1, 2007, 1-9

- [22] *Radziszewski P.*: Badania reologicznych cech masyk-sów asfaltowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, **21**, 140, 2001, 251-261
- [23] *Cao L.*: Experiment Research of Filler-Bitumen Ratio Impact on Asphalt Mixture Performance. Applied Mechanics and Materials, **361-363**, 2013, 1851-1856
- [24] *Judycki J.*: Niewłaściwe proporcje 'wypełniacz-asfalt' w betonie asfaltowym możliwą przyczyną uszkodzeń nawierzchni. Drogownictwo, 10, 2007, 311-313
- [25] *Cong Z., Zheng N.*: The effect of filler-asphalt ratio on the performance of hot-mix asphalt, Proceedings of the 24th Southern African Transport Conference (SATC 2005), Pretoria, 2005, 973-978
- [26] *Błażejowski K.*: SMA. Teoria i praktyka. Rettenmaier Polska, Warszawa, 2007
- [27] *Teng T.P.*: Superpave Mixture Design Guide. FHWA, Washington, D.C., 2001
- [28] Superpave Fundamentals Reference Manual. FHWA, Washington, D.C., 2000
- [29] *Wang H., Li G.*: Study of factors influencing gussasphalt mixture performance. Construction and Building Materials, **101**, 2015, 193-200
- [30] *Jian-Shiuh C., Min-Chih L., Chien-Chung H., Ching-Hsiung W.*: Fundamental Characterization of Engineering Properties of Gussasphalt Mixtures. Journal of Materials in Civil Engineering, **23**, 12, 2011, 1719-1726
- [31] PN-EN 12591:2010 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Wymagania dla asfaltów drogowych. PKN, Warszawa, 2010
- [32] PN-EN 13108-4:2006 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania. Część 4: Mieszanka HRA. PKN, Warszawa, 2006
- [33] WT-1 Kruszywa do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utwaleń na drogach krajowych. GDDKiA, Warszawa, 2014
- [34] PN-EN 13043:2004 Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu. PKN, Warszawa, 2004
- [35] *Grabowski W., Słowik M., Bilski M.*: Ocena wpływu dodatku asfaltu naturalnego Trynidad Epuré na wybrane właściwości asfaltów drogowych, Problemy naukowo-badawcze budownictwa. 56 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB, Krynica, 2010, 279-286
- [36] *Bichajło L., Kołodziej K.*: Wpływ dodatku asfaltu naturalnego Trynidad Epure na podstawowe cechy asfaltu drogowego. Technika Transportu Szynowego, **22**, 2015, 126-130
- [37] *Isacsson U., Zeng H.*: Low-temperature cracking of polymer-modified asphalt. Materials and Structures, **31**, 1998, 58-63
- [38] PN-EN 12594:2007 Asfalty i produkty asfaltowe – Przygotowanie próbek do badań. PKN, Warszawa, 2007
- [39] PN-S 96025:2000 Drogi samochodowe i lotniskowe – Nawierzchnie asfaltowe – Wymagania. PKN, Warszawa, 2000
- [40] WT-2 2014 – Część I. Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania techniczne. GDDKiA, Warszawa, 2014
- [41] Laborhandbuch für Trinidad Naturasphalt. Carl Unge-witter Trinidad Lake Asphalt GmbH & Co., Brema, 2013
- [42] PN-EN 13589 Asfalty i lepiszcza asfaltowe – Oznaczenie siły rozciągania asfaltów modyfikowanych, metoda z duktylometrem. PKN, Warszawa, 2011
- [43] *Noguera A.H., Miró R.*: Asphalt toughness effect on bituminous mixture fatigue behavior. Revista Ingeniería de Construcción, **26**, 2, 2011, 224-239
- [44] *Lyngdall E.T.*: Critical analysis of PH and PG + asphalt binder test methods. University of Wisconsin, Madison, 2015
- [45] *Zhang F., Yu J.*: The research for high-performance SBR compound modified asphalt. Construction and Building Materials, **24**, 3, 2010, 410-418
- [46] *Wang J., Qin Y., Huang S., Xu J.*: Laboratory Evaluation of Aging Behaviour of SBS Modified Asphalt. Advances in Materials Science and Engineering, **2017**, 2017, 1-12, DOI: 10.1155/2017/3154634
- [47] *Mohammed M., Parry T., Grenfell J.R.A.*: Influence of fibres on rheological properties and toughness of bituminous binder. Construction and Building Materials, **163**, 2018, 901-911
- [48] *Andriescu A., Hesp S., Youtcheff J.*: Essential and Plastic Works of Ductile Fracture in Asphalt Binders. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, **1875**, 2004, 1-7
- [49] PN-EN 12697-20:2012 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 20: Badanie twardości (penetracji) na próbkach sześciennych lub cylindrycznych (CY). PKN, Warszawa, 2009
- [50] PN-EN 12697-25:2016 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 25: Badanie cyklicznego ściskania. PKN, Warszawa, 2016
- [51] PN-EN 13108-20:2016 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Wymagania – Część 20: Badanie typu. PKN, Warszawa, 2016