PIOTR RADZISZEWSKI¹⁾JERZY PIŁAT²⁾MICHAŁ SARNOWSKI³⁾KAROL J. KOWALSKI⁴⁾JAN B. KRÓL⁵⁾

INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURE ON PROPERTIES OF MATERIALS USED IN BRIDGE ASPHALT PAVEMENT STRUCTURES

WPŁYW WYSOKIEJ TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW STOSOWANYCH W KONSTRUKCJACH ASFALTOWYCH NAWIERZCHNI MOSTOWYCH

STRESZCZENIE. Nawierzchnia mostowa w szczególnych przypadkach może być poddawana krótkotrwałym oddziaływaniom ekstremalnie wysokiej temperatury, która jest wynikiem pożarów spowodowanych, np. awarią pojazdów. Lepiszczą asfaltowe i mieszanki mineralno-asfaltowe, jako materiały termoplastyczne w warstwach nawierzchniowych i izolacyjnych zmieniają swoje właściwości w zależności od temperatury. W artykule przedstawiono wyniki badań i analiz dotyczących wpływu krótkotrwałego działania wysokiej temperatury na zachowanie się lepiszczy i mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do izolacji i nawierzchni mostowych. Badaniom wpływu wysokiej temperatury wygrzewania poddano papy izolacyjne, mastyksy tradycyjne (M), nowe rodzaje mastyksów wysokogrysowych (SMA-MA), mieszanki grysowo-mastyksowe (SMA), asfaltu lanego (MA) oraz betonu asfaltowego (AC). Stwierdzono, że temperaturę 250°C należy uznać za temperaturę graniczną. Powyżej tej temperatury w lepiszczach asfaltowych następuje nieodwracalna utrata właściwości lepkosprężystych, co w konsekwencji powoduje zniszczenie nawierzchni. Istnieje możliwość budowy nawierzchni mostowych o zwiększonej odporności na działanie wysokiej temperatury, będącej wynikiem wystąpienia pożarów, poprzez właściwy dobór konstrukcji nawierzchni, materiałów i zastosowanie odpowiedniej technologii wykonania.

SŁOWA KLUCZOWE: asfaltowa nawierzchnia mostowa, izolacja, lepiszcze, mieszanki mineralno-asfaltowe, wysoka temperatura.

ABSTRACT. Bridge deck surface might exceptionally become exposed to extreme high temperature conditions during fires caused, for example by vehicle failures. Bituminous binders and asphalt mixtures are thermoplastic components of surfacing and waterproofing layers, which means that their properties vary depending on the temperature. These materials, when exposed to high temperature conditions, may lose their viscoelastic properties, resulting in failure of pavement. This paper presents the results of experimental research and analyses of the effect of exposure to high temperature for a short period of time on the behaviour of bitumens and asphalt mixtures used for installation of waterproofing layers and bridge deck surfacing courses. The following materials were subjected to thermal conditioning under this research: bituminous waterproofing membranes, traditional mastic (M), mastic asphalt enriched with chippings (SMA-MA), stone mastic asphalt (SMA), mastic asphalt (MA) and asphalt concrete (AC). The temperature of 250°C was found to be the limit above which the bituminous binders permanently lose their viscoelastic properties, this resulting in irrecoverable damage of pavement. It is possible to obtain bridge deck surfaces featuring increased resistance to high temperature exposure during fire by appropriately designing the pavement structure, selecting adequate materials and choosing optimum installation method.

KEYWORDS: binder, asphalt bridge deck surfacing, asphalt mixtures, high temperature, waterproofing.

¹⁾ Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska; p.radziszewski@il.pw.edu.pl

²⁾ Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska; j.pilat@il.pw.edu.pl

³⁾ Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska; m.sarnowski@il.pw.edu.pl (✉)

⁴⁾ Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska; k.kowalski@il.pw.edu.pl

⁵⁾ Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska; j.krol@il.pw.edu.pl

1. WSTĘP

Nawierzchnia mostowa stanowi ważny element obiektu mostowego i w dużej mierze decyduje o jego trwałości. Jest ona poddawana obciążeniom od ruchu pojazdów oraz wpływu środowiska. W porównaniu do nawierzchni na korpusie ziemnym nawierzchnia mostowa charakteryzuje się znacznie mniejszą grubością. Oddziaływania dynamiczne od ruchu pojazdów są w niej tłumione w mniejszym zakresie. Prowadzi to do występowania dodatkowych obciążeń dynamicznych i wibracji obiektu. Nawierzchnia mostowa jest bardzo wrażliwa na zmiany temperatury otoczenia ze względu na grubość konstrukcji. W czasie eksploatacji nawierzchnia mostowa nagrzewana jest intensywnie w okresie lata, natomiast w okresie zimowym może być poddawana oddziaływaniu bardzo niskiej temperatury [1, 2]. Mieszanka mineralno-asfaltowa do warstw izolacji i nawierzchni mostowej może zostać przegrzana w wyniku stosowania zbyt wysokiej temperatury technologicznej, choć w szczególnych przypadkach może być poddawana krótkotrwałym działaniom ekstremalnie wysokiej temperatury, będącej wynikiem pożarów głównie w następstwie awarii pojazdów.

Na obiektach mostowych w Europie stosuje się powszechnie nawierzchnie asfaltowe [3]. Lepiszczka asfaltowe i mieszanki mineralno-asfaltowe, jako materiały termoplastyczne w warstwach nawierzchniowych i izolacyjnych, zmieniają swoje właściwości w zależności od temperatury. W mieszance mineralno-asfaltowej, w zależności od temperatury, składu chemiczno-grupowego asfaltu, rodzaju i uziarnienia mieszanki mineralnej, zachodzą znaczne zmiany strukturalne, wyrażające się wzrostem lepkości lepiszcza i wskaźników mechanicznych mieszanki mineralno-asfaltowej [4]. Materiały te powinny zapewnić nawierzchni na obiekcie mostowym odporność na odkształcenia trwałe w okresie letnim, odporność na pęknięcia niskotemperaturowe w ujemnej temperaturze występującej w okresie zimowym oraz na zmęczenie w okresie występowania temperatury pośredniej. Zbyt wysoka temperatura może powodować utratę właściwości lepkosprężystych lepiszczy i mieszanek mineralno-asfaltowych, prowadząc do zniszczenia nawierzchni. Jak dowodzą badania [5], asfalty i polimeroasfalty produkowane w Polsce spełniają wymagania związane z odpornością na deformacje trwałe, jednak w mniejszym stopniu spełniają wymagania odporności na pękanie niskotemperaturowe. Należy ocenić, jak zmieniają się te właściwości w wyniku działania wysokiej temperatury spowodowanej pożarem. W związku z tym, w artykule przedstawiono wyniki badań i analiz [6] dotyczących

1. INTRODUCTION

The bridge deck surfacing is an important part of a bridge structure, highly relevant to its durability. The loads imposed on the bridge deck pavement include traffic and environmental impacts. Bridge deck surfaces are much thinner than road pavements placed on earth embankments. Bridge structures offer less damping of the dynamic actions coming from traffic as compared to earth embankments. As a result, additional dynamic loads and vibrations need to be considered. Small thickness makes the bridge pavement more sensitive to temperature variations. During service bridge deck surface must be able to withstand heating up in summer and freezing temperatures during winter [1, 2]. Overheating asphalt mixtures used for waterproofing and/or surfacing layers happens mostly during construction. Only exceptionally it happens in service due to short-term exposure to extremely high temperature conditions due to fires, for example started as a consequence of vehicle breakdowns.

In Europe asphalt mixtures are a typical bridge deck surfacing material [3]. Bituminous binders and asphalt mixtures are thermoplastic components of the surfacing courses and waterproofing layers, which means that their properties vary depending on temperature. The structural performance of asphalt mixtures depends largely on the temperature, chemical and group composition of bitumen as well as the type and grading of aggregate, as manifested by increased viscosity of binder and changes in mechanical parameters [4]. These materials are expected to provide bridge surfaces that combine resistance to permanent deformation in summer with resistance to low-temperature cracking in winter and fatigue resistance at moderate temperature values. Exposure to excessively high temperature may result in losing viscoelastic properties by the binders and by the asphalt mixtures as a whole, resulting in pavement failure. According to experimental research [5] the pure and polymer-modified bitumens manufactured in Poland while exhibiting good resistance to permanent deformations are not so resistant to low-temperature cracking. It needs to be determined how these properties change under exposure to high temperature during fire. This paper presents the results of experimental research and analyses [6] carried out to determine the effect of exposure to high temperature for a short period of time on the behaviour of bitumens and asphalt mixtures used for installation of waterproofing and surfacing layers on bridges.

wpływu krótkotrwałego działania wysokiej temperatury na zachowanie się lepiszczy i mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do izolacji pomostów i warstw konstrukcyjnych nawierzchni mostowych.

2. KONSTRUKCJA NAWIERZCHNI MOSTOWEJ. ZDARZENIA POŻAROWE

Na pomostach obiektów mostowych wykonuje się grunto-
wanie podłoża, a następnie układa się warstwę izolacji
przeciwwodnej. Na tak przygotowanym pomoście wyko-
nuje się nawierzchnię, która składa się z warstwy ochronnej
i warstwy ścieralnej [1]. Schemat układu warstw konstruk-
cyjnych nawierzchni asfaltowych na drogowych obiektach
mostowych z pomostem stalowym i betonowym przedsta-
wiono na Rys. 1.

Izolacje przeciwwodne stosowane są najczęściej w postaci
materiałów arkuszowych lub jako materiały powłokowe.
Asfaltowe izolacje arkuszowe (papy termozgrzewalne,
papy samoprzylepne) są obecnie najczęściej stosowanymi
materiałami do zabezpieczenia powierzchni pomostów [7].
Zabezpieczenia w postaci pap charakteryzują się prostotą
wykonania. Innym rodzajem izolacji, często stosowanym
na obiektach mostowych, jest tradycyjny mastyks asfalto-
wy, składający się z wypełniacza (najczęściej wapiennego)
i drobnego kruszywa z dużą zawartością lepiszcza asfalto-
wego (około 16% m/m). Mastyks ten charakteryzuje się
brakiem wolnych przestrzeni oraz bardzo dobrym powiąza-
niem z podłożem i warstwą ochronną. Izolacja z tradycyj-
nego mastyksu asfaltowego dobrze wypełnia drobne nie-
równości podłoża betonowego.

Nowym rodzajem izolacji jest mastyks wysokogrysowy
(SMA-MA) przeznaczony przede wszystkim do izolacji
pomostów obiektów inżynierskich, który może być rów-
nież stosowany jako warstwa ochronna izolacji [7]. Idea
mastyksu wysokogrysowego polega na połączeniu korzy-
stnych cech mastyksu tradycyjnego, tj. szczelności i elasty-
czności, z korzystnymi cechami mieszanki grysowo-ma-
styksowej typu SMA, z których najważniejszą jest
odporność na deformacje trwałe. Mieszanki tego typu cha-
rakteryzują się nieciągłą krzywą uziarnienia oraz mini-
malną zawartością wolnych przestrzeni w zagęszczonej
warstwie (0,3 do 0,8%) [8]. Z kolei do nawierzchni mosto-
wej może być stosowany asfalt lany (MA) jako warstwa
izolacyjna, warstwa ochronna i warstwa ścieralna. Do
warstw konstrukcyjnych nawierzchni mostowych poza as-
faltem lanym można używać betonu asfaltowego (AC) lub
SMA.

2. BRIDGE DECK SURFACING SYSTEM. EVENTS OF FIRE

Installation of deck surfacing starts by priming the sur-
face and then waterproofing layer is placed. Next the
bridge deck surfacing system can be installed, comprising
the layer protecting the waterproofing and the wearing
course [1]. The construction of bituminous bridge surfac-
ing systems for steel and concrete decks respectively is
presented schematically in Fig. 1.

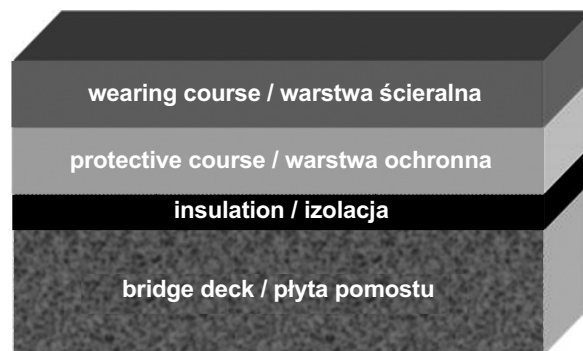


Fig. 1. Profile of the bridge deck surfacing system [1]
Rys. 1. Układ warstw konstrukcji nawierzchni na płycie
pomostu [1]

Sheet-membrane or coating systems are most often used
for waterproofing bridge decks. Currently bituminous
sheet materials (torch-on or self-adhesive bituminous
membranes) are the most popular ones applied for this
purpose [7], and they are known for simple installation. A
popular alternative to sheet waterproofing systems is tra-
ditional bitumen mastic composed of filler (most often
limestone), fine aggregate and a high amount of bitumi-
nous binder (cerca 16 % m/m). It features zero air voids
content and very good bonding to the substrate as well as
to the protecting course. When used for waterproofing it
is very effective in filling small irregularities in the con-
crete substrate.

Yet another (recently developed) waterproofing material
is mastic enriched with chippings (SMA-MA), designed
primarily for waterproofing bridge decks, which can also
be used as a protective course laid on the applied water-
proofing [7]. The idea behind the development of
SMA-MA was to obtain a material combining the desired
features of traditional mastic, i.e. low permeability and
high elasticity with the performance characteristics of
SMA, the most important of them being resistance to per-
manent deformation. SMA-MA mixtures are gap-graded

Nawierzchnie drogowe mogą być narażone na krótkotrwałe działanie wysokiej temperatury związanej z pożarem obiektu inżynierskiego lub pojazdów samochodowych. Zdarzenia takie okazują się szczególnie niebezpieczne dla użytkowników dróg i niszczące dla konstrukcji nawierzchni drogowej w przypadku ich wystąpienia na mostach/estakadach oraz w tunelach. Oddziaływanie wysokiej temperatury na konstrukcje budowlane jest najlepiej zbadane i opisane w odniesieniu do budynków, w znacznie mniejszym stopniu zaś odnośnie mostów i innych obiektów inżynierskich. Oddziaływanie wysokiej temperatury na konstrukcje mostowe i przypadki pożarów mostów występują sporadycznie, ale ich skutki generują poważne koszty społeczne, związane z zamknięciem mostu i z wyznaczeniem objazdów, co łączy się z wydłużeniem czasu przeprawy [9]. Większość publikacji na temat pożarów mostów dotyczy wpływu wysokiej temperatury na konstrukcje obiektów mostowych, natomiast zniszczenia ich nawierzchni są opisywane w bardzo małym zakresie.

Większość pożarów mostów powodowana jest nieostrożnością w obchodzeniu się z ogniem lub stanowi jedną z konsekwencji wypadków komunikacyjnych. Często przyczyną pożaru jest zapalenie się drewnianych rusztowań, pomostów technicznych lub materiałów drewnianych składowanych pod mostem w rejonie przyczółków. Poza wymienionymi drewnianymi elementami, źródłem pożarów mogą być również materiały łatwopalne stosowane podczas budowy lub remontu obiektów inżynierskich oraz pożary instalacji technicznych, głównie gazowych, prowadzonych wzdłuż konstrukcji mostu [9]. Opisane źródła pożarów mostów w sposób bezpośredni działają na konstrukcję obiektu, natomiast na nawierzchnię mostową pożar oddziałuje najczęściej pośrednio, np. przez rozgrzaną płytę pomostu. Jednak największe zagrożenie zarówno dla ludzi, jak i dla konstrukcji stanowi pożar w tunelu. W zależności od temperatury oraz czasu trwania pożaru oddziaływanie wysokiej temperatury na nawierzchnię drogową może być różne – temperatura w tunelu w trakcie pożaru może przekraczać 1000°C [10].

Wysoka temperatura działająca na nawierzchnię asfaltową destrukcyjnie oddziałuje przede wszystkim na lepiszcze asfaltowe. Istnieje temperatura, powyżej której następuje wypalanie się lepiszcza asfaltowego poprzez jego skrakowanie [2]. Badania w piecu do wypalania asfaltu prowadzone w Purdue University w USA [11] wykazały, że próbki mieszanki mineralno-asfaltowej poddane oddziaływaniu wysokiej temperatury, powyżej temperatury krytycznej, wykazywały gwałtowne zmiany masy świadczące o spalaniu się asfaltu. Stwierdzono, że po przekroczeniu w piecu

and feature a minimum in-place air void content (0.3–0.8%) [8]. The bridge deck surfacing may be made of mastic asphalt (MA) and this material can be used for waterproofing as well as for protective and wearing courses. Other materials which may be used for installation of deck surfacing courses include asphalt concrete (AC) and stone mastic asphalt (SMA).

Road pavements may become exposed to a high temperature for a short period of time as a result of the engineering structure or a vehicle catching fire. Apart from being extremely hazardous to the road users, such events may seriously affect the road pavements if they occur on bridges/viaducts and in tunnels. The action of high temperature on such structures has been most extensively investigated and described in case of buildings and much less in relation to bridges and other structures carrying traffic. While being rather seldom, fires on bridges resulting in high temperature acting on the structure cause major social disturbances being a consequence of closing the bridge to traffic and setting up diversion routes, what increases the crossing time [9]. Most of the articles on the subject focus on the effect of temperature on the structure itself putting aside the effect it has on the deck surfacing.

The primary causes of bridge fires include traffic accidents and careless use of fire. The parts most likely to catch fire are timber scaffolds, catwalks and timber materials stored under the bridge near abutments. Beside the above-mentioned timber components there are other sources of fire, such as combustibles used during bridge construction/renewal works and third-party utility lines attached to the bridge structure, mainly gas pipelines [9]. Fires started on the above-described sources act directly on the bridge structure and the surfacing is generally affected indirectly, for example through hot deck. Note that the most dangerous for both humans and the structure are tunnel fires. The severity of action on the road surface depends on the temperature and duration of fire, with the former reaching over 1000°C during tunnel fires [10].

In the pavement itself the component which is the most sensitive to the action of high temperature is the bituminous binder. There is a critical temperature above which it burns out in the process of cracking [2]. In the bitumen oven tests carried out at the Purdue University (U.S.) [11] the asphalt mixture specimens exhibited dynamic mass changes when heated above the critical temperature. It was established that from the point when the temperature inside the test chamber exceeds 345°C the increase of the specimen temperature is caused by burning the bituminous binder (being an exothermic reaction) rather than by

temperatury 345°C, temperatura mieszanki wzrasta nie z powodu procesu podgrzewania, ale na skutek wypalania lepiszcza asfaltowego (reakcja egzotermiczna).

3. MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

3.1. MATERIAŁY

Do oceny wpływu oddziaływania wysokiej temperatury wybrano lepiszcza powszechnie stosowane w Polsce oraz nowe lepiszcza modyfikowane używane do izolacji mostowych, warstwy ochronnej i ścieralnej nawierzchni mostowej. Rodzaje asfaltów drogowych, polimeroasfaltów (PMB), lepiszczy modyfikowanych asfaltem naturalnym i rozdrobnioną gumą, stosowane w badaniach przedstawiono w Tabl. 1.

Table 1. Types of tested asphalt binders

Tablica 1. Lepiszczasfaltowe zastosowane w badaniach

Binder type / Rodzaj lepiszcza
Paving-grade bitumen / Asfalt drogowy 50/70
Paving-grade bitumen / Asfalt drogowy 35/50
Paving-grade bitumen / Asfalt drogowy 20/30
Polymer-modified bitumen / Polimeroasfalt PMB 65/105-60
Polymer-modified bitumen / Polimeroasfalt PMB 45/80-55
Polymer-modified bitumen / Polimeroasfalt PMB 25/55-60
Paving-grade bitumen / Asfalt drogowy 35/50 + 2.0% (m/m) natural bitumen / asfalt naturalny
Paving-grade bitumen / Asfalt drogowy 70/100 + 15% (m/m) crumb rubber / rozdrobniona guma

Modyfikacja asfaltów drogowych asfaltem naturalnym jest stosowana głównie w technologii asfaltów lanych. Dodatek asfaltu naturalnego poprawia urabialność mieszanki mineralno-asfaltowej oraz oddziałuje stabilizująco na konsystencję asfaltów i mieszanek [12, 13]. Innym rodzajem modyfikatora asfaltów stosowanym w budownictwie drogowym jest rozdrobniona guma ze zużytych opon samochodowych. Dodatek gumy poprawia właściwości techniczne w zakresie niskich i średnich wartości temperatury eksploatacji nawierzchni [14, 15]. Z kolei do oceny wpływu oddziaływania wysokiej temperatury na izolacyjne materiały arkuszowe zastosowano dwa rodzaje papy asfaltowej zgrzewalnej, z osnową z włókniny poliestrowej z lepiszczem modyfikowanym SBS. Natomiast badania wpływu wysokiej temperatury na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych obejmowały mieszanki do izolacji i warstw konstrukcyjnych nawierzchni mostowych. Ocenie poddano izolacje z mastyksu tradycyjnego (M), asfaltu lanego (MA) oraz z mastyksu o zwiększonej zawartości frakcji grysowej

a further increase of the ambient temperature inside the chamber.

3. MATERIALS AND TEST PROCEDURE

3.1. MATERIALS

The effect of high temperature on bitumen was examined on binders commonly used in Poland and recently developed modified binders used for installation of bridge waterproofing layer, protective and wearing courses of the bridge deck surfacing system. All the tested paving-grade bitumens, polymer-modified bitumens, binders modified with natural bitumen or crumb rubber are listed in Table 1.

Paving-grade bitumens modified with natural bitumen are used mainly in mastic asphalt mixtures. Addition of natural bitumen improves mixture workability and has a stabilising effect on the consistency of bitumens and mixtures [12, 13]. Another material added to paving-grade bitumens to modify their properties is crumb rubber obtained by grinding scrap tyres. It is known to improve the performance of pavement at low and medium service temperatures [14, 15]. The second group of tested materials was represented by two types of torch-on polyester reinforced SBS modified bitumen membrane. The effect of heat on the properties of asphalt mixtures was tested on the mixtures used for waterproofing and surfacing layers. Waterproofing materials were represented by traditional mastic (M), mastic asphalt (MA) and mastic enriched with chippings (SMA-MA). The traditional mastic mixture was designed for traffic load rating KR3-6 (according to the Polish classification system). It was made of the following constituent materials proportioned as follows:

(SMA-MA). Mastyks tradycyjny zaprojektowano na kategorię ruchu KR3÷6. Do mieszanki mineralno-asfaltowej tego rodzaju zastosowano następujące rodzaje i zawartości materiałów:

- wypełniacz dodany - mączka wapienna, 35% (m/m);
- piasek łamany z otoczków, frakcji 0/0,063 mm, 52% (m/m);
- lepiszcza, 13% (m/m):
 - PMB 45/80-55,
 - 35/50,
 - 35/50 + 2,0% (w stosunku do masy lepiszcza) asfaltu naturalnego.

Zaprojektowano mieszankę mineralno-asfaltową typu asfalt lany MA 8 na kategorię ruchu KR3÷7. Badania odporności na działanie wysokiej temperatury wykonano również dla mieszanki mineralno-asfaltowej typu mastyks wysokogrysowy SMA-MA 8, uwzględniając wymagania odnośnie uziarnienia dla mieszanki SMA 8 KR5÷7. Projektując mieszankę mineralną typu SMA-MA kierowano się zasadą znacznego zwiększenia zawartości frakcji piaskowej i wypełniaczowej przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej zawartości frakcji grysowej powyżej 65% (m/m). Ponadto, w celu zapewnienia maksymalnej szczelności zagęszczonej mieszanki SMA-MA (zawartość wolnej przestrzeni 0,5%), zastosowano podwyższoną do 9% (m/m) zawartość lepiszcza asfaltowego. Do warstw konstrukcyjnych nawierzchni mostowej, tj. warstwy ochronnej i ścieralnej, zaprojektowano mieszanki mineralno-asfaltowe z mastyksu grysowego SMA 8 oraz z betonu asfaltowego AC 11 dla ruchu KR5÷7. Skład mieszanek mineralno-asfaltowych typu MA, SMA-MA, SMA i AC przedstawiono w Tabl. 2.

- extra filler - limestone powder - 35 % (m/m);
- 0/0.063 mm crushed sand obtained by grinding cobblestone - 52 % (m/m),
- binder - 13 % m/m:
 - PMB 45/80-55,
 - 35/50,
 - 35/50 + natural bitumen added at 2.0 % (m/m) in relation to the binder weight.

The mastic asphalt mixture used in the test is designated MA 8 and it has design load rating KR3÷7. The effect of heat was checked also on one mixture of mastic enriched with chippings designated SMA-MA 8, based on the grading requirements specified for SMA 8 mixture for traffic load rating KR5÷7. The idea behind the design of SMA-MA mixture was to considerably increase the content of sand and filler fractions while maintaining a high content of coarse aggregate (above 65 % m/m). Moreover, the proportion of bituminous binder was increased to 9 % (m/m) in order to maximise the in-place density of SMA-MA mixture (0.5% air voids). The two structural layers of pavement, i.e. protective and wearing courses, are made of bituminous mixtures: SMA 8 and asphalt concrete AC 11 designed for traffic load rating KR5÷7. The tested asphalt mixtures, i.e. MA, SMA-MA, SMA and AC, are specified in Table 2.

Table 2. Composition of asphalt mixtures
Tablica 2. Skład mieszanek mineralno-asfaltowych

Materials / Materiały	MA 8 [%] (m/m)	SMA-MA 8 [%] (m/m)	SMA 8 [%] (m/m)	AC 11 [%] (m/m)
Binder / Lepiszcze	8.0	9.0	7.0	5.4
Mineral filler / Mączka wapienna	27.6	12.7	11.2	8.5
Fine aggregate, crushed / Kruszywo drobne łamane	22.1	12.7	12.1	28.4
Gabbro stone aggregate / Grys gabbro 2/5	18.4	14.6	17.7	9.5
Gabbro stone aggregate / Grys gabbro 5/8	23.9	51.0	52.0	17.0
Gabbro stone aggregate / Grys gabbro 8/11	–	–	–	31.2
	100.0	100.0	100.0	100.0

Do asfaltu lanego zastosowano dwa twarde asfalty drogowe 20/30 i 35/50, asfalt 35/50 z dodatkiem asfaltu naturalnego (2% w stosunku do masy lepiszcza) oraz polimeroasfalt PMB 25/55-60. Do mastyksu grysowego SMA i betonu asfaltowego zastosowano polimeroasfalt PMB 45/80-55

Mastic asphalt mixtures were made using two paving-grade bitumens with low penetration values: 20/30 and 35/50, 35/50 bitumen modified with natural bitumen

(warstwa ścieralna), polimeroasfalt PMB 25/55-60 (warstwa ochronna). Do mastyksu wysokogrysiowego SMA-MA użyto lepiszcza: PMB 45/80-55 oraz lepiszcze gumowo-asfaltowe (asphalt rubber) o zawartości rozdrobnionej gumy 15% (m/m) [16].

3.2. METODYKA BADAŃ

Lepiszczasfaltowe, papy i mieszanki mineralno-asfaltowe poddano oddziaływaniu wysokiej temperatury przez jedną godzinę, przyjmując trzy wartości temperatury wygrzewania: 200°C, 250°C i 300°C. Wartości te wynikają z założenia, że należy zbadać właściwości materiałów, które nie są narażone bezpośrednio na proces spalania (temperatura dochodząca do 1000°C), lecz pośrednio, np. przez rozgrzaną płytę pomostu obiektu inżynierskiego. Materiały izolacyjno-nawierzchniowe, które były bezpośrednio narażone na źródło pożaru, należy bezwzględnie wymienić. Grubość wygrzewanej warstwy lepiszcza wynosiła około 1-2 mm, a mieszanki mineralno-asfaltowej około 50 mm, przy zapewnionym dostępie powietrza. Przyjęte wartości temperatury wygrzewania są wyższe od dopuszczalnych wartości, których przekroczenie może prowadzić do istotnych zmian właściwości materiałów asfaltowych. Asfalty drogowe nie powinny być wygrzewane powyżej temperatury zapłonu, która według normy PN-EN wynosi od 220 do 240°C. Maksymalna temperatura wygrzewania lepiszcza asfaltowego modyfikowanego elastomerami powinna być zgodna z zaleceniami producenta. Najczęściej wynosi ona około 200°C.

Na podstawie wyników badań autorów [8] ustalono, że zakres wartości temperatury od 200°C do 300°C jest zakresem, w którym następują znaczące zmiany właściwości lepiszczy, pap asfaltowych oraz mieszanek mineralno-asfaltowych, prowadzące do zniszczenia materiału. W zależności od rodzaju materiału asfaltowego zakres destrukcji w badanym przedziale temperatury wygrzewania jest zróżnicowany. Ocenę wpływu wysokiej temperatury na zmianę właściwości lepiszczy asfaltowych przeprowadzono na podstawie pomiarów penetracji w temperaturze 25°C, temperatury mięknięcia według PiK oraz określenia lepkości dynamicznej według Brookfielda w temperaturze 60°C, 90°C, 110°C i 135°C. Próbkę papy termozgrzewalnej po procesie wygrzewania poddano badaniu giętkości w temperaturze -30°C, według procedury przewidzianej dla badań materiałów arkuszowych.

W celu oceny odporności na wysokie wartości temperatury mieszanek mineralno-asfaltowych, po procesie wygrzewania wykonano: próbki do badania penetracji stemplem

(2 % m/m in relation to the binder weight) and polymer-modified bitumen PMB 25/55-60. SMA and asphalt concrete mixtures were made using polymer-modified bitumens: PMB 45/80-55 – for wearing course and PMB 25/55-60 – for protective course. SMA-MA mixtures were made using two binders: PMB 45/80-55 and crumb-rubber modified bitumen with 15 % (m/m) crumb rubber content [16].

3.2. TEST PROCEDURE

Bituminous binders, waterproofing sheets and asphalt mixtures were subjected to thermal conditioning for one hour at the following three temperature levels: 200°C, 250°C and 300°C. These values result from the objective of testing, which was to test the properties of materials which do not caught fire themselves (what could result in reaching the temperature of 1000°C) but are exposed to heat indirectly, for example through the hot deck of a bridge on fire. Waterproofing/ surfacing materials directly affected by fire must be replaced in any case. The thermal conditioning depth in test conditions ensuring access of air was circa 1-2 mm in the case of binder and circa 50 mm in case of asphalt mixtures. The adopted thermal conditioning temperatures are higher than the critical temperatures above which the properties of bituminous materials may change. During the testing paving-grade bitumens should not be heated up above the ignition point of 220-240°C as per European Standards. In case of bitumens modified with thermoplastic elastomers the maximum thermal conditioning temperature should be taken in accordance with the manufacturer's recommendations. The manufacturers usually specify the temperature of 200°C.

According to the results of our earlier research [8] binders, bitumen sheets materials and asphalt mixtures change their properties to a degree at which failure may occur when heated up to 200-300°C. The degree of destruction at the above-mentioned temperature range varies between different bituminous materials. Variation of the properties of bituminous binders under the effect of heat was established by measuring penetration at 25°C, ring-and-ball softening point and dynamic viscosity (using Brookfield viscometer) at the test temperatures of 60°C, 90°C, 110°C and 135°C. The effect of heat on torch-on membrane was checked by subjecting the specimens to flexural fatigue test at minus 30°C according to the relevant test procedure used for testing sheet materials.

w temperaturze 40°C (mieszanki mastyksu tradycyjnego, mastyksu SMA-MA, asfaltu lanego MA), próbki do badania modułu sztywności w temperaturze 10°C według metody pośredniego rozciągania IT-CY (wszystkie mieszanki mineralno-asfaltowe) oraz próbki do badania trwałości zmęczeniowej (mieszanki SMA-MA, SMA, AC). Badanie trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych wykonano metodą belki czteropunktowego zginania przy następujących warunkach:

- temperatura badania +10°C,
- czteropunktowe cykliczne zginanie belki przy stałej amplitudzie odkształcenia zmieniającej się według funkcji sinusoidalnej,
- częstotliwość obciążenia 10 Hz.

Wyniki badań właściwości lepiszczy i mieszanek mineralno-asfaltowych przedstawiono w postaci wskaźnika zmiany właściwości IS , obliczonego na podstawie wzoru:

$$IS_{x \text{ właściwość}} = \frac{Y_{x \text{ właściwość}}(200, 250, 300^\circ\text{C})}{Y_{x \text{ właściwość}}}, \quad (1)$$

gdzie:

$Y_{x \text{ właściwość}}(200, 250, 300^\circ\text{C})$ – wartość, np. penetracji, wartości temperatury mięknięcia lepiszcza asfaltowego, itp. po wygrzewaniu w temperaturze odpowiednio: 200°C, 250°C, 300°C,

$Y_{x \text{ właściwość}}$ – wartość, np. penetracji, wartości temperatury mięknięcia lepiszcza asfaltowego, itp. przed wygrzewaniem.

4. OCENA WPŁYWU WYSOKIEJ TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI LEPI SZCZY ASFLATOWYCH

Wybrane wyniki badania konsystencji lepiszczy asfaltowych na podstawie badań penetracji i temperatury mięknięcia w funkcji wysokiej temperatury zostały przedstawione na Rys. 2 i 3 w formie wskaźnika zmiany konsystencji IS . Kryterium niezmienności badanej cechy wynosi 1.0 ($IS = 1.0$) i zostało zaznaczone na wykresach czerwoną linią. Każda zmiana wskaźnika konsystencji w stosunku do wartości 1.0 oznacza zmianę badanej właściwości w wyniku działania temperatury wygrzewania. Na Rys. 2 prezentującym wyniki badań penetracji, wartość IS poniżej 1.0 oznacza utwardzenie lepiszcza (zmniejszenie stopnia penetracji), a na Rys. 3 przedstawiającym wyniki badań temperatury mięknięcia według PiK, $IS < 1.0$ oznacza obniżenie T_{PiK} . Analizując wyniki badań przedstawione na Rys. 2 i 3 można stwierdzić, że badane

High temperature resistance of asphalt mixtures was established with the following tests carried out on the specimens prepared after thermal conditioning: depth of indentation at 40°C (traditional mastic, SMA-MA and mastic asphalt), IT-CY test at 10°C (all asphalt mixtures) and fatigue test (SMA-MA, SMA, AC). Fatigue strength was determined with four-point bending test on prismatic specimens under the following test conditions:

- +10°C test temperature,
- four-point bending with constant sine-shaped strain response,
- 10 Hz loading frequency.

The test results were fitted in the following formula to calculate the index IS representing the degree of change of the tested properties of bitumen binders and asphalt mixtures:

$$IS_{x \text{ property}} = \frac{Y_{x \text{ property}}(200, 250, 300^\circ\text{C})}{Y_{x \text{ property}}}, \quad (1)$$

where:

$Y_{x \text{ property}}(200, 250, 300^\circ\text{C})$ – value of the property, for example: penetration, binder softening point, etc. after thermal conditioning at test temperatures of 200°C, 250°C and 300°C respectively,

$Y_{x \text{ property}}$ – value of the property, for example: penetration, binder softening point, etc. before thermal conditioning.

4. EVALUATION OF THE EFFECT OF HIGH TEMPERATURE ON THE PROPERTIES OF BITUMINOUS BINDERS

The results defining bitumen consistency measured in the penetration and softening point tests were used to calculate the index of consistency change presented in relation to the temperature of thermal conditioning in Fig. 2 and Fig. 3 respectively. The red line represents the stability criterion for a given property of 1.0 ($IS = 1.0$). Any variation from the value of 1.0 signifies that the value of the property has changed as a result of thermal conditioning. Thus IS value below 1.0 in Fig. 2 indicates hardening of binder (lowering of pen value) and $IS < 1.0$ in Fig. 3 (presenting the softening point test results) indicates lowering of the $T_{R \&B}$ value obtained in the ring-and-ball test. The test results presented in Fig. 2 and Fig. 3 allow for the conclusion that the thermal conditioning at test temperatures up to 250°C has not significantly affected the consistency of the tested bitumen binders. At 300°C only

lepiszcza asfaltowe poddane wygrzewaniu w temperaturze do 250°C nie wykazują istotnych zmian konsystencji. W temperaturze 300°C asfalty drogowe charakteryzują się nieznacznym wzrostem penetracji, natomiast lepiszcza modyfikowane polimerami wykazują porównawczo większe zmiany konsystencji – wartość penetracji wzrasta, a temperatura mięknięcia według PiK maleje. Taka zmiana konsystencji polimeroasfaltów może być spowodowana dekopolimeryzacją modyfikatora.

a slight increase of penetration is observed in the case of paving grade bitumens as compared to relatively greater changes in consistency noted in the case of polymer-modified bitumens represented by increasing penetration and decreasing ring-and-ball softening point. Such change of consistency of polymer-modified bitumens can be attributed to copolymer decomposition of modifier.

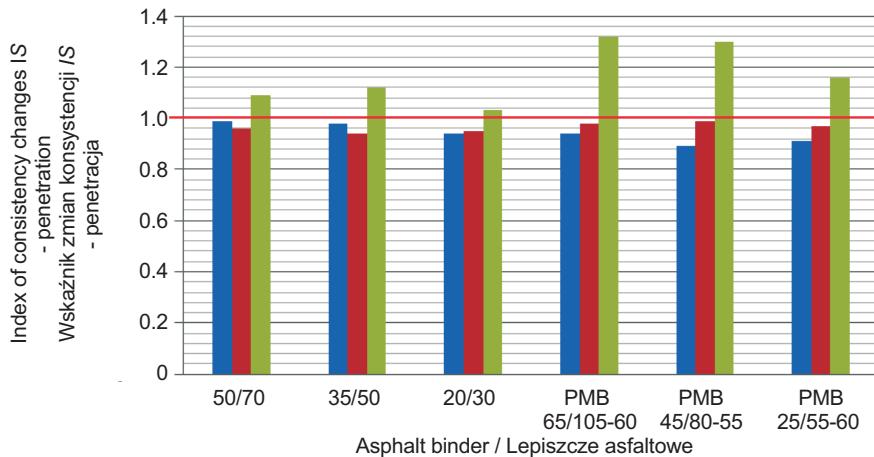


Fig. 2. Index of consistency changes - penetration of asphalt binders vs heating temperature

Rys. 2. Wskaźnik zmian konsystencji - penetracja lepiszczy asfaltowych w funkcji temperatury wygrzewania

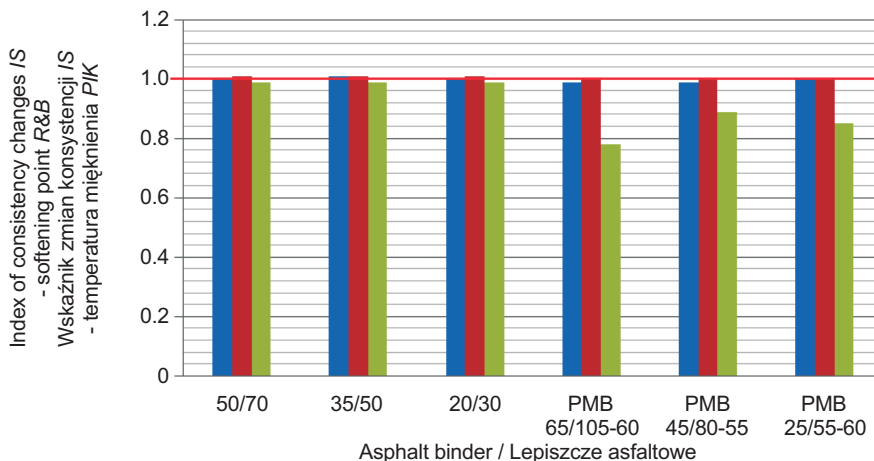


Fig. 3. Index of consistency changes - softening point of asphalt binders vs heating temperature

Rys. 3. Wskaźnik zmian konsystencji - temperatura mięknięcia lepiszczy asfaltowych w funkcji temperatury wygrzewania

Na podstawie analizy danych przedstawionych na Rys. 4 można zauważyć, że zmiany lepkości lepiszczy asfaltowych są podobne do zmian zachodzących w zakresie temperatury mięknięcia i penetracji. Obserwuje się znaczne obniżenie lepkości lepiszczy modyfikowanych polimerami w temperaturze powyżej 250°C, szczególnie w przypadku lepiszcza PMB 65-105/60 (wskaźnik *IS* mniejszy od 1.0). Asfalty drogowe niemodyfikowane wykazują bardzo małe zmiany lepkości w całym zakresie badanych wartości temperatury.

From the data presented in Fig. 4 one can see that changes in viscosity of bitumen binders follow similar pattern as the changes to the softening point and to the penetration value. Thus, a significant decrease in viscosity of polymer-modified bitumens occurs when the temperature exceeds 250°C, which is particularly evident in the case of PMB 65-105/60 (*IS* below 1.0). Opposite to that, the viscosity of paving grade bitumens varies very little over the temperature range used in the test.

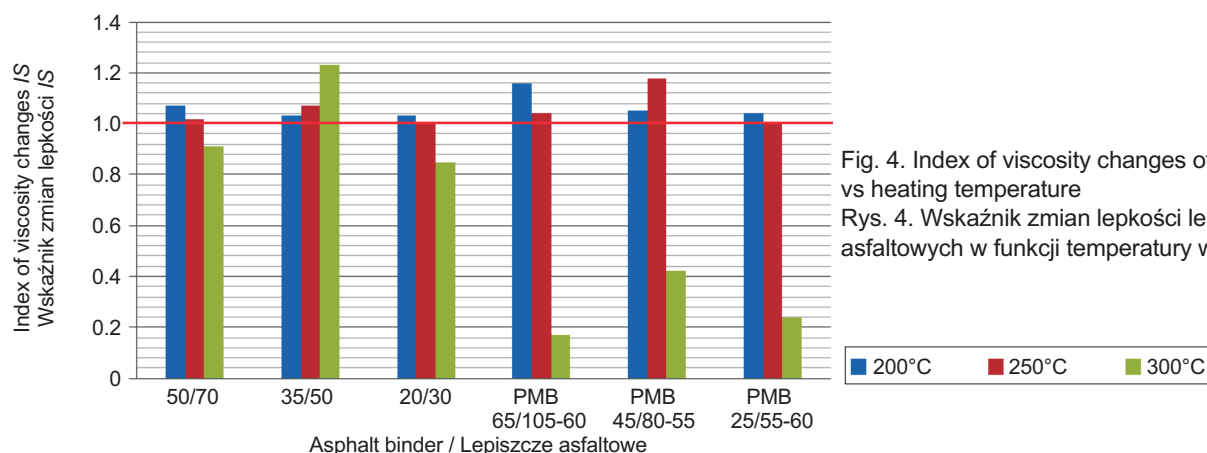


Fig. 4. Index of viscosity changes of asphalt binders vs heating temperature

Rys. 4. Wskaźnik zmian lepkości lepiszczy asfaltowych w funkcji temperatury wygrzewania

W podsumowaniu można stwierdzić, że asfalty drogowe i polimeroasfalty charakteryzują się stałością struktury wewnętrznej, która nie ulega degradacji w temperaturze 200°C i 250°C. W wyniku oddziaływania wysokiej temperatury 300°C, w przypadku asfaltów drogowych, następuje zaburzenie ustalonego wcześniej stanu równowagi między składnikami grupowymi asfaltu. Pojawia się uszkodzenie struktury wewnętrznej, polegające na pękaniu wiązań w cząsteczkach asfaltu (krakowaniu), co powoduje zmiany w ich budowie koloidalnej. W przypadku polimeroasfaltów oddziaływanie wysokiej temperatury 300°C powoduje zmiany konsystencji (obniżenie temperatury mięknięcia i lepkości) w wyniku zniszczenia przestrzennej sieci polimerowej. Wyniki te stanowią potwierdzenie opisanego w pracy [17] wpływu podwyższonej temperatury na trwałą zmianę struktury sieci polimerowej w polimeroasfaltach.

5. OCENA WPŁYWU WYSOKIEJ TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI PAP I MASTYKSÓW STOSOWANYCH DO IZOLACJI

Izolacyjne wyroby arkuszowe w postaci pap termozgrzewalnych produkowane są obecnie z zastosowaniem asfaltów modyfikowanych polimerami. Tego rodzaju wyroby, w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury na polimer zawarty w lepiszczu, mogą być narażone na zniszczenie sieci polimerowej [18]. Analizując wymagania dla pap termozgrzewalnych należy stwierdzić, że dla tego rodzaju materiałów określa się odporność na działanie podwyższonej temperatury w 100°C. Na podstawie tej temperatury trudno wnioskować o odporności materiału na wysoką temperaturę wywołaną pożarem. Badania odporności na

This allows for the conclusion that both paving-grade and polymer-modified bitumens feature stability of internal structure which remains unaffected at 200°C and 250°C. At a higher temperature, namely 300°C, the initially established balance of component groups becomes disturbed in the case of paving-grade bitumens. Internal structure is affected by thermal cracking of bonds in asphaltenes resulting in changes in their colloidal structure. In case of polymer-modified bitumens heating up to 300°C brings consistency changes (lowered softening point and viscosity) resulting from breaking up the polymer network. These outcomes confirm that high temperature permanently affects the polymer network structure of polymer-modified bitumens, as previously described in [17].

5. EVALUATION OF THE EFFECT OF HIGH TEMPERATURE ON THE PROPERTIES OF BITUMINOUS WATERPROOFING MATERIALS: MEMBRANES AND MASTICS

Torch-on membranes are sheet waterproofing materials which nowadays are produced with the use of polymer-modified bitumens. In products of this kind the polymer network may become destroyed as a result of action of heat on the polymer contained in the binder [18]. Looking into performance requirements specified for torch-on membranes it can be noticed that high-temperature resistance is tested at the temperature of 100°C. The results obtained at such temperature can hardly be used to predict the resistance of the material to temperature conditions during fires. Under this research, resistance of torch-on membranes used for bridge deck waterproofing was tested

wysokie wartości temperatury pap termozgrzewalnych stosowanych do izolacji pomostów wykonano po ich wygrzewaniu w temperaturze 200°C, 250°C i 300°C, a zmiany powierzchni próbek pap mostowych po procesie wygrzewania przedstawiono na Rys. 5 [19].

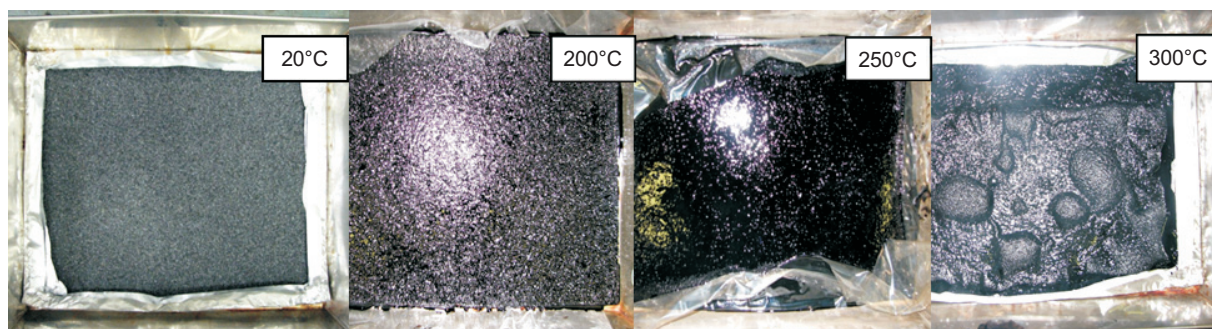


Fig. 5. Surface of bridge torch-on membrane after high temperature thermal conditioning

Rys. 5. Powierzchnia papy mostowej termozgrzewalnej poddana oddziaływaniu wysokiej temperatury

Na podstawie oceny wizualnej powierzchni papy (Rys. 5) można stwierdzić, że w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury wykazuje ona, w zależności od temperatury wygrzewania, różny stopień destrukcji. W temperaturze wygrzewania 200°C zmiany są nieznaczne, w 250°C następuje zmiana układu jej warstw, a w 300°C papy uległy całkowitej degradacji. Posypka mineralna przemieściła się w kierunku osnowy, a na powierzchni, w warstwie polimeroasfaltu, wystąpiły liczne pęcherze i nierówności.

Wyniki badania giętkości pap termozgrzewalnych w temperaturze -30°C wykazały, że zarówno przed, jak i po wygrzewaniu już w temperaturze 200°C ulegają one zniszczeniom. Powierzchnia górna pap oryginalnych wykazuje włoskowate pęknięcia wierzchniej warstwy masy powłokowej po badaniu giętkości. Po wygrzewaniu w temperaturze 200°C pojawiają się pęknięcia wierzchniej warstwy masy powłokowej na całej grubości do powierzchni osnowy. Papy wygrzewane w temperaturze 250°C i 300°C po badaniu giętkości w temperaturze -30°C wykazują bardzo liczne pęknięcia na całej grubości masy powłokowej i osnowy.

Wyjaśnieniem występowania zniszczeń papy pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury jest utrata właściwości elastycznych przez masę powłokową papy. Następuje zniszczenie przestrzennych wiązań polimerowych w masie powłokowej, których istnienie gwarantuje dobre właściwości polimeroasfaltu. W wyniku tego procesu następuje rozpad cząstek polimeru, co może spowodować pogorszenie adhezji pap do podłoża. Ocenę odporności na działanie wysokiej temperatury mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do izolacji pomostów przedstawiono w postaci

after heating up the specimens to 200°C, 250°C and 300°C and the resulting changes observed on the surfaces of specimens are presented in Fig. 5 [19].

Looking at the surfaces of the tested membranes (Fig. 5) it can be determined that the degree of deterioration depends on the test temperature. The deterioration varies from slight changes at 200°C through changes in profile at 250°C to a total degradation at 300°C. The mineral topping has moved down towards reinforcing material and numerous blisters and irregularities have developed on the PMB surface.

The tested torch-on membranes were damaged in flexural fatigue tests at minus 30°C, both before and after thermal conditioning, even at the test temperature of 200°C. After the flexural fatigue test hairline cracks developed on the surface of original materials. Thermal conditioning at 200°C caused cracking extending to the whole depth of the upper coating, reaching the top of fleece. Membranes subjected to thermal conditioning at 250°C and 300°C after subsequent flexural fatigue test exhibited numerous cracks extending through the upper coating and reinforcement.

Deterioration of the material under the effect of high temperature can be attributed to loss of elasticity by the upper coating. Heat destroys the polymeric links in the coating of polymer-modified bitumen to which it owes its desired properties. This process results in breaking up polymer molecules and this can affect bond of the sheet to substrates. Thermal resistance of asphalt mixtures designed for bridge deck waterproofing was evaluated for traditional mastic (M) and mastic enriched with chippings SMA-MA 8 on the basis of the value of IS for penetration and stiffness modulus in relation the thermal conditioning temperature, as presented in Fig. 6 and Fig. 7.

wskaźnika IS zmiany penetracji stemplem i modułu sztywności mastyksu tradycyjnego (M) oraz mastyksu wysokogrysowego (SMA-MA 8) z różnymi rodzajami lepiszczy asfaltowych, w funkcji temperatury wygrzewania (Rys. 6 i 7).

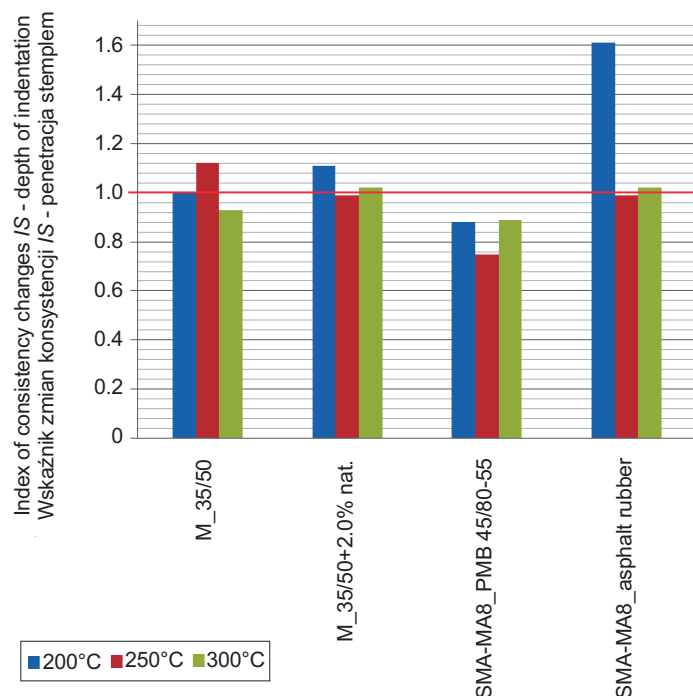


Fig. 6. Index of consistency changes - depth of indentation of traditional mastic asphalt and SMA-MA vs heating temperature
Rys. 6. Wskaźnik zmian konsystencji - penetracja stemplem mastyksu tradycyjnego i mastyksu SMA-MA w funkcji temperatury wygrzewania

Na podstawie analizy wyników badań przedstawionych na Rys. 6 stwierdzono, że pod wpływem wysokiej temperatury w zakresie 200°C - 300°C mastyks tradycyjny z asfaltem drogowym i asfaltem drogowym z dodatkiem asfaltu naturalnego wykazują nieznaczne zmiany konsystencji określonej badaniem penetracji stemplem. Natomiast mastyksy wysokogrysowe SMA-MA z lepiszczami modyfikowanymi wykazują istotne zmiany konsystencji, szczególnie w przypadku mieszanki z lepiszczem gumowo-asfaltowym. W temperaturze wygrzewania 200°C mastyks ten uplastycznia się (indeks $IS > 1.0$), co jest najprawdopodobniej efektem dalszej reakcji asfaltu z cząstkami gumy w lepiszczu gumowo-asfaltowym. W wyższej temperaturze wygrzewania (250°C i 300°C) następuje korzystna stabilizacja konsystencji mastyksu SMA-MA z dodatkiem gumy. Mieszanka SMA-MA z lepiszczem modyfikowanym polimerem w całym zakresie badanych wartości temperatury zachowuje podobny stopień konsystencji, co może być wynikiem stabilizującego oddziaływania szkieletu grysowego mieszanki

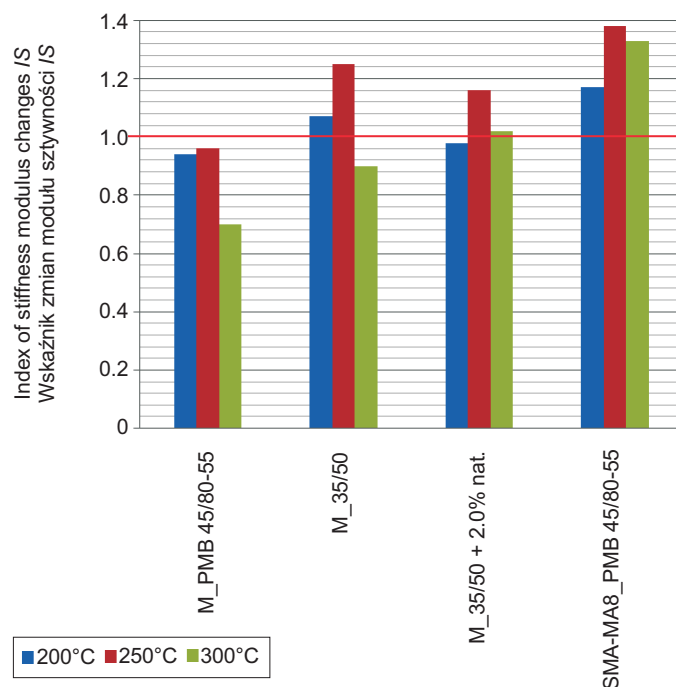


Fig. 7. Index of changes in stiffness modulus of traditional mastic and SMA-MA vs heating temperature

Rys. 7. Wskaźnik zmian modułu sztywności mastyksu tradycyjnego i mastyksu SMA-MA w funkcji temperatury wygrzewania

The test results as presented in Fig. 6 allow for the conclusion that heating traditional mastics to 200-300°C results in only slight changes of consistency of mixtures containing paving grade bitumens: pure and modified with natural bitumen. In opposition, SMA-MA mixtures including modified binders exhibit significant changes of consistency, the greatest in the case of crumb rubber modifier. Thermal conditioning at 200°C results in softening of this material ($IS > 1.0$), most probably the effect of further reaction of bitumen with rubber molecules contained in the binder. At higher temperatures (250°C and 300°C) a desirable stabilisation occurs in the case of SMA-MA mixture including rubber-modified bitumen. The same mixture, yet including polymer-modified binder exhibits more or less the same consistency over the whole temperature range, which can be attributed to stabilising effect of the stone skeleton present in SMA-MA mixtures. This inhibits the destructive effect of high temperature on the polymer network.

On the basis of stiffness modulus test results determined for asphalt mastics (Fig. 7) it can be said that as the temperature rises from 200°C to 250°C the value of IS ratio for stiffness modulus increases considerably in the case of traditional mastic including 35/50 bitumen. Conversely,

mineralnej. Destrukcyjny wpływ wysokiej temperatury na sieć przestrzenną polimeroasfaltu jest w tym przypadku zredukowany.

Na podstawie analizy wyników badań zmian modułu sztywności mastyksów (Rys. 7) można stwierdzić, że tradycyjny mastyks izolacyjny (M) z asfaltem 35/50, w miarę wzrostu temperatury wygrzewania od 200°C do 250°C, wykazuje znaczny wzrost wskaźnika zmiany modułu sztywności IS . W tym samym zakresie wartości temperatury wygrzewania mastyks z polimeroasfaltem wykazuje nieznaczne zmiany wskaźnika. Temperatura wygrzewania 250°C jest dla mastyksów z asfaltem 35/50 i z polimeroasfaltem temperaturą krytyczną, powyżej której następuje znaczny spadek modułu sztywności. Moduł sztywności w temperaturze wygrzewania 300°C mastyksu tradycyjnego z asfaltem 35/50 jest niższy od modułu sztywności mastyksu wygrzewanego w temperaturze 250°C, co może być spowodowane procesem niszczenia struktury lepiszcza w mieszance. Wskaźnik zmiany modułu sztywności mastyksu tradycyjnego z polimeroasfaltem w zakresie temperatury wygrzewania 250°C - 300°C wykazuje duży spadek sztywności (do wartości $IS = 0,7$). Tak znaczne uplastycznienie mastyksu jest wynikiem degradacji struktury sieci polimerowej wskutek oddziaływania temperatury 300°C. Wyniki badania mastyksu SMA-MA z polimeroasfaltem wykazują wyższe usztywnienie niż mastyksu tradycyjnego z różnymi lepiszczami. Należy podkreślić, że mastyks SMA-MA w wyższej temperaturze wygrzewania (250°C i 300°C) zachowuje dużą niezmienną sztywność. Mastyks tradycyjny z asfaltem naturalnym wykazuje podobną stałość sztywności w całym zakresie badanych wysokich wartości temperatury.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że badane mastyksy tradycyjne i mastyks SMA-MA charakteryzują się stabilnością konsystencji i sztywności w funkcji zmian temperatury wygrzewania. Należy podkreślić, że mastyksy z lepiszczami modyfikowanymi polimerem są nieodporne na działanie wysokiej temperatury, szczególnie powyżej 250°C. Obserwuje się korzystne zachowanie mastyksu tradycyjnego z dodatkiem asfaltu naturalnego oraz mastyksu SMA-MA z lepiszczem gumowo-asfaltowym.

6. OCENA WPŁYWU WYSOKIEJ TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW DO WARSTW KONSTRUKCYJNYCH NAWIERZCHNI

Wyniki badań wpływu wysokiej temperatury na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych z różnymi lepiszczami,

only a slight increase of IS is noted in the case of the tested mastic including polymer-modified bitumen. The temperature of 250°C is the critical temperature over which the stiffness modulus of asphalt mastics decreases rapidly for both mixtures – with pure 35/50 bitumen and with PMB. Traditional mastic with 35/50 bitumen has lower stiffness modulus after thermal conditioning at 300°C as compared to 250°C which can be attributed to breaking up the binder structure. In case of traditional mastic with polymer-modified bitumen the value of IS for stiffness modulus indicates a considerable decrease of stiffness between the thermal conditioning temperatures of 250°C and 300°C (to the value of $IS = 0.7$). Such a degree of softening results from thermal degradation of the polymer network structure at 300°C. According to the test results the stiffening rate of SMA-MA mixture including polymer-modified bitumen is greater than that of traditional mastics containing different binders. Attention is drawn to the fact that SMA-MA mixtures maintain their high stiffness during thermal conditioning at higher temperatures (250°C and 300°C). Traditional mastic including natural bitumen exhibits similar stability of stiffness at all the test temperatures.

Therefore, it can be concluded that the tested traditional mastics and SMA-MA feature stability of consistency and stiffness at different thermal conditioning temperatures. Note that polymer-modified binders make mastics sensitive to high temperatures, especially over 250°C. Desirable behaviour was noted in the case of traditional mastic modified with natural bitumen and SMA-MA mixture, including rubber-modified bitumen.

6. THE EFFECT OF HEAT ON THE PROPERTIES OF SURFACING MATERIALS

The effect of high-temperature on asphalt mixtures used for protective and wearing courses of bridge deck surfacing was determined for various binders and the obtained test results are presented in Fig. 8. From analysing the change ratio calculated for stiffness modulus for all the tested mixtures (Fig. 8) subjected to thermal conditioning at 250°C a slightly higher increase in stiffness as compared to the results obtained after thermal conditioning at 200°C can be seen. At the temperature of 300°C MA 8 mixtures, except for the one modified with natural bitumen, exhibit a similar, slight increase in stiffness. At the temperature range 250-300°C mastic asphalt including binder modified with natural bitumen has more stable

stosowanych do warstwy ochronnej i ścieralnej nawierzchni mostowej, przedstawiono na Rys. 8. Analizując wartości wskaźnika zmian modułu sztywności wszystkich badanych mieszanek (Rys. 8) w temperaturze 250°C należy stwierdzić, że wykazują one nieznaczne usztywnienie w odniesieniu do wartości usztywnienia w 200°C. W temperaturze 300°C asfalty lane MA 8, oprócz mieszanki zawierającej asfalt naturalny, wykazują podobne nieznaczne wartości usztywnienia. Asfalt lany z lepiszczem modyfikowanym asfaltem naturalnym wykazuje większą stabilność konsystencji w zakresie wartości temperatury wygrzewania 250°C - 300°C w porównaniu do mieszanki MA z asfaltem drogowym 35/50. Można także stwierdzić, że mastyks wysokogrysowy SMA-MA 8 z polimeroasfaltem wykazuje nieznaczne usztywnienie w odniesieniu do wartości usztywnienia w 200°C, co jest efektem korzystnego oddziaływania szkieletu mineralnego.

W podsumowaniu można stwierdzić, że oddziaływanie wysokiej temperatury na zmiany wskaźnika usztywnienia IS mieszanek mineralno-asfaltowych zależy przede wszystkim od rodzaju mieszanki mineralno-asfaltowej. Na wartość wskaźnika IS wpływa również ilość i rodzaj zastosowanego lepiszcza. Obserwuje się korzystny stabilizujący wpływ dodatku asfaltu naturalnego na właściwości mieszanek w wysokich wartościach temperatury, w odróżnieniu od bardziej wrażliwych na zmianę wskaźnika usztywnienia mieszanek z polimeroasfaltem.

Badania trwałości zmęczeniowej przeprowadzono na próbkach z betonu asfaltowego AC 11, mastyksu grysowego SMA 8 i mastyksu wysokogrysowego SMA-MA 8 z polimeroasfaltami, poddanych wcześniej działaniu temperatury wygrzewania 250°C. Wyniki badań trwałości zmęczeniowej przedstawiono na Rys. 9 i Rys. 10. Otrzymano liniowe równania regresyjne, adekwatnie opisujące wyniki badania z dużą mocą korelacji wyrażoną współczynnikiem R^2 . Analizując wyniki badań przedstawione na Rys. 9 i Rys. 10 należy stwierdzić, że trwałość zmęczeniowa betonu asfaltowego po procesie wygrzewania jest znacznie niższa niż przed wygrzewaniem. Dużo mniejsze spadki trwałości zmęczeniowej występują w przypadku mieszanek SMA i SMA-MA.

W podsumowaniu można stwierdzić, że krótkotrwałe działanie wysokiej temperatury wygrzewania powoduje nieznaczne zmniejszenie trwałości zmęczeniowej mieszanki SMA-MA i SMA, natomiast w dużo większym stopniu zmniejszenie trwałości zmęczeniowej występuje w przypadku betonu asfaltowego AC. Należy to tłumaczyć tym, że grubość błonki mastyksu otaczającej ziarna kruszywa w mieszance SMA-MA jest największa i w efekcie zawarte

consistency as compared to MA mixtures including 35/50 paving-grade bitumen. It can also be said that the increase of stiffness of SMA-MA 8 including polymer modified bitumen is only slightly higher at these temperature as compared to 200°C, which can be attributed to the beneficial effect of mineral skeleton.

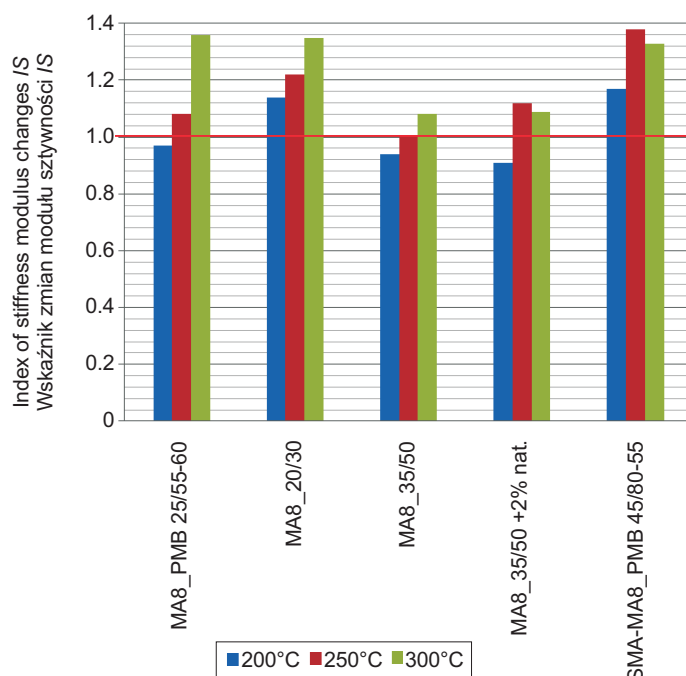


Fig. 8. Index of changes in stiffness modulus of mastic asphalt and SMA-MA vs heating temperature

Rys. 8. Wskaźnik zmian modułu sztywności asfaltu lanego i mastyksu SMA-MA w funkcji temperatury wygrzewania

Therefore, it can be concluded that in the case of asphalt mixtures the effect of high temperature on the variation of IS for stiffness depends primarily on the type of mixture. It is related also to the binder type and content. Natural bitumen was found to have a stabilising effect on the properties of binders exposed to heat as opposed to mixtures modified with polymer-modified bitumen which were found to be more sensitive in this respect.

The following bituminous mixtures were subjected to thermal conditioning at 250°C and then tested for fatigue resistance: AC11, SMA8 and SMA-MA 8 containing polymer modified bitumens. The fatigue test results are presented in Fig. 9 and Fig. 10. Linear regression equations were obtained, adequately describing the test results having a strong correlation expressed by R^2 coefficient. According to the results presented in Fig. 9 and in Fig 10 thermal conditioning considerably reduces the fatigue life of asphalt concrete. This decrease is much smaller in case of SMA and SMA-MA mixtures.

tam lepsze jest najmniej podatne na niekorzystne zmiany właściwości lepkosprężystych.

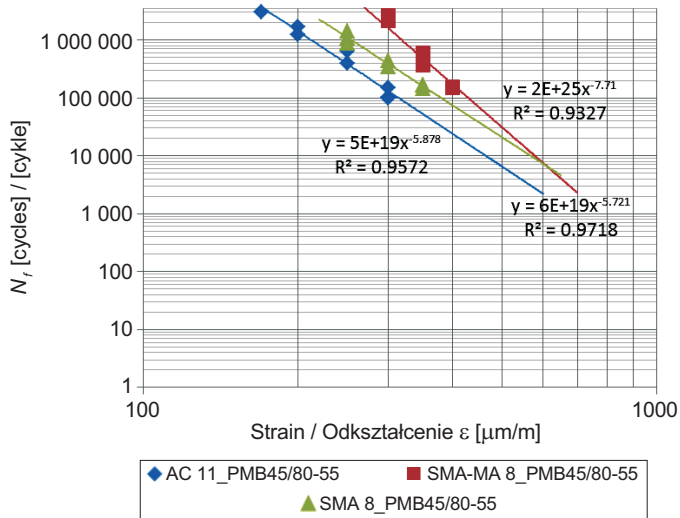


Fig. 9. Fatigue life N_f of AC, SMA and SMA-MA asphalt mixtures before thermal conditioning
Rys. 9. Trwałość zmęczenia N_f mieszanek AC, SMA i SMA-MA przed wygrzewaniem

7. WNIOSKI

Nawierzchnie obiektów mostowych w wyniku awarii lub wypadków samochodowych mogą być narażone na działanie wysokich wartości temperatury w wyniku wystąpienia ewentualnych pożarów. Na podstawie wyników badań zmian właściwości materiałów stosowanych do nawierzchni mostowych pod wpływem wysokiej temperatury można sformułować następujące wnioski:

1. Asfalty drogowe pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury (200°C, 250°C, 300°C) wykazują nieznaczne zmiany właściwości, natomiast polimeroasfalty w temperaturze powyżej 250°C wykazują bardzo duże zmiany spowodowane zniszczeniem struktury polimeru. Niestabilność struktury asfaltu modyfikowanego polimerem (PMB) w wysokiej temperaturze może być spowodowana dekompozycją polimeru SBS, co skutkuje zmniejszeniem lepkości, zwiększeniem penetracji i zmniejszeniem T_{PIK} . Zmiana właściwości analizowanych polimeroasfaltów wpływa nie tylko na właściwości lepkości, ale również na mieszkankę mineralno-asfaltową. Zmiany właściwości lepkości modyfikowanego polimerem mogą być wynikiem zmniejszającego oddziaływania polibutadienu, który stanowi ponad 70% kopolimeru SBS.

Finally, it can be concluded that short-term exposure to high temperature decreases the fatigue life to a small degree in the case of SMA-MA and SMA mixtures and to a much greater degree in the case of AC mixtures. This is because in SMA-MA mixtures feature the greatest coating thickness of aggregate particles making the binder less sensitive to undesirable changes to viscoelastic properties.

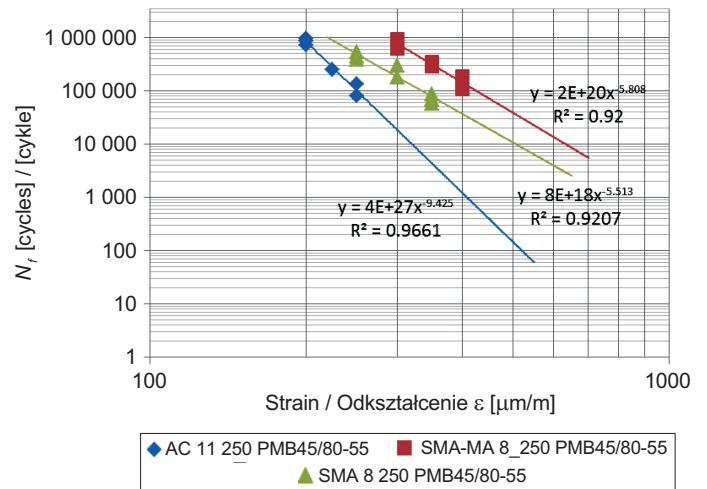


Fig. 10. Fatigue life N_f of AC, SMA and SMA-MA asphalt mixtures after heating at 250°C
Rys. 10. Trwałość zmęczenia N_f mieszanek AC, SMA i SMA-MA po wygrzewaniu w temperaturze 250°C

7. CONCLUSIONS

Bridge decks surfacing systems may become exposed to high temperature as a result of fire events. The following conclusions have been drawn on the basis of experimentally determined changes in the properties of bridge deck surfacing materials after thermal conditioning:

1. High-temperature exposure (200°C, 250°C, 300°C) changes the properties of bitumens: slightly - in the case of paving-grade bitumens or considerably - in the case of polymer-modified bitumens subjected to temperature over 250°C due to breaking up of the polymer structure. The observed thermal instability of PMB structure can be attributed to decomposition of SBS polymer resulting in reduced viscosity, increased penetration and lower ring-and-ball softening point $T_{R\&B}$. The change of properties of the analysed PMBs is not limited to the binder itself but affects the asphalt mixture as a whole. Change of properties of polymer-modified bitumens can be caused by the softening effect of polybutadiene whose content in SBS exceeds 70%.

2. Dodatek asfaltu naturalnego do asfaltów drogowych wpływa korzystnie na zwiększenie odporności asfaltów na wysoką temperaturę (300°C).
3. Wyniki badania pap termozgrzewalnych wykazały brak odporności papy na działanie wysokiej temperatury. Papy po wygrzewaniu w temperaturze 200°C ulegają zniszczeniom, a w wyższej temperaturze wygrzewania następuje ich całkowita degradacja strukturalna.
4. Mastyksy tradycyjne (M), mastyksy wysokogrytowe (SMA-MA) i asfalty lane (MA) z lepiszczami modyfikowanymi polimerami, stosowane do warstwy izolacji, są odporne na działanie wysokiej temperatury wygrzewania w zakresie 200-250°C. Powyżej temperatury 250°C następuje w lepiszczach modyfikowanych polimerem nieodwracalna utrata właściwości lepko-sprężystych.
5. Wysoka temperatura wygrzewania mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych do warstwy ochronnej i ścieralnej nawierzchni mostowej powoduje znaczne obniżenie trwałości zmęczeniowej betonu asfaltowego (AC), w mniejszym stopniu mieszanki SMA, a w najmniejszym stopniu mieszanki SMA-MA.
6. Istnieje możliwość budowy nawierzchni mostowych o zwiększonej odporności na działanie wysokiej temperatury, będących wynikiem wystąpienia pożarów, przez odpowiedni dobór konstrukcji nawierzchni i materiałów, a także zastosowanie odpowiedniej technologii wykonania.
2. Addition of natural bitumen improves the thermal resistance of bitumens at high temperature (300°C).
3. Torch-on membranes were found to have no resistance to the action of high temperature. Thermal conditioning at 200°C caused damage and higher temperatures brought total structural degradation of the material.
4. Traditional mastic (M), mastic enriched with chip-pings (SMA-MA) and mastic asphalt (MA) designed for waterproofing exhibited resistance to thermal conditioning at 200-250°C. Above the critical temperature of 250°C polymer-modified binders permanently lose their viscoelastic properties.
5. The effect of high-temperature exposure on the fatigue life of surfacing mixtures designed for protective and wearing courses is considerable in the case of asphalt concrete (AC), not as big in the case of SMA and the least in the case of SMA-MA mixtures.
6. It is possible to obtain bridge pavements featuring increased resistance to high temperature exposure during fire by appropriately designing the pavement structure, selecting adequate materials and choosing optimum installation method.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research project has been financed from the state budget under the Polish highway agency (GDDKiA) research scheme for years 2011-2013. The authors would like to thank Paweł Mieczkowski, Ph.D., DSc. of the West Pomeranian University of Technology, Szczecin and Piotr Pokorski, M.Sc. of the Warsaw University of Technology for their most valuable comments and contribution to this research.

INFORMACJE DODATKOWE

Praca naukowa została sfinansowana ze środków budżetowych w ramach projektu badawczego dla Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w latach 2011-2013. Autorzy pracy składają podziękowania dr hab. inż. Pawłowi Mieczkowskiemu z Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie oraz mgr inż. Piotrowi Pokorskiemu z Politechniki Warszawskiej za cenne uwagi i wkład w realizację tematu.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Piłat J., Radziszewski P.: Nawierzchnie asfaltowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2010
- [2] Stosch H.J.: Błędy wykonawstwa nawierzchni bitumicznych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1977
- [3] Bocci E., Canestrari F.: Analysis of Structural Compatibility at Interface Between Asphalt Concrete Pavements and Orthotropic Steel Deck Surfaces. Journal of the Transportation Research Board: Asphalt Materials and Mixtures, **2293**, 1, 2012, 1-7
- [4] Stefańczyk B., Mieczkowski P.: Dodatki, katalizatory i emulgatory w mieszankach mineralno-asfaltowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2010

- [5] Radziszewski P., Kowalski K.J., Król J.B., Sarnowski M., Pilat J.: Quality assessment of bituminous binders based on the viscoelastic properties: Polish experience. *Journal of Civil Engineering and Management*, **20**, 1, 2014, 111-120
- [6] Radziszewski P., Pilat J., Sarnowski M., Kowalski K.J., Król J.B., Pokorski P., Liphardt A.: Raport z pracy badawczej dla Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie – Rozwiązania materiałowo-technologiczne izolacji i nawierzchni obiektów mostowych, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013
- [7] Mieczkowski P.: Izolacje z pap asfaltowych na obiektach mostowych. *Izolacje*, **15**, 2, 2010, 16-18
- [8] Sarnowski M., Radziszewski P., Pilat J., Kowalski K.J., Król J.B.: Ocena trwałości mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do izolacji i nawierzchni obiektów mostowych, 60 Konferencja Naukowa Lublin-Krynica 2014, Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2014
- [9] Zobel H., Golubińska A.: Pożary mostów. *Studia i Materiały*, z. 52, IBDiM, Warszawa, 2000
- [10] Rimac I., Simun M., Dimter S.: Comparison of Pavement Structures in Tunnels. *e-GFOS*, **5**, 8, 2014, 12-18
- [11] Kowalski K.J., McDaniel R.S., Olek J., Shah A.: Modified Ignition Oven Test Procedure for Determination of Binder Content in Hot Mix Asphalt Containing Dolomite Aggregate. *Journal of Testing and Evaluation*, **39**, 6, 2011, 1060-1069
- [12] Gawel I., Kalabińska M., Pilat J.: *Asfalty drogowe*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2014
- [13] Danowski M.: Nawierzchnie z dodatkiem asfaltu naturalnego Trynidad. *Nawierzchnie asfaltowe*, **18**, 2, 2009, 7-13
- [14] Gawel I., Pilat J., Radziszewski P., Kowalski K.J., Król J.B.: Rubber modified bitumen, in: *Polymer modified bitumen. Properties and characterization*. Woodhead Publishing Limited, Oxford, 2011, chapter 4
- [15] Way G.B.: Asphalt-Rubber 45 Years of Progress. *Proceedings of the Asphalt Rubber 2012 Conference*, Munich, Germany, October 2012
- [16] Radziszewski P., Pilat J., Sarnowski M., Kowalski K.J., Król J.B., Krupa Z.: Asphalt Rubber as Alternative of Polymer Modified Bitumen. *Asphalt Rubber 2012 Conference Roads Of the Future*, Munich, Germany, October 2012, 475-488
- [17] Król J.B.: Nowa metoda analizy mikrostruktury asfaltów modyfikowanych polimerami. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **7**, 4, 2008, 23-46
- [18] Fritc H.W., Hean S.: Doświadczenia z izolacjami i nawierzchniami na obiektach mostowych (Erfahrungen mit Brückenabdichtungen und Brückenbelägen). *Nowości Zagranicznej Techniki Drogowej*, 141, 2000, 85-104
- [19] Sarnowski M., Radziszewski P., Kowalski K.J., Król J.B.: Impact of high process temperature on viscoelastic properties of polymer modified asphalt insulations and bridge pavements. *3-rd International Conference on Road and Rail Infrastructure, CETRA 2014*, 28-30 April 2014, Split, Croatia, 325-330