



POLITECHNIKA WARSZAWSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ

Instytut Dróg i Mostów

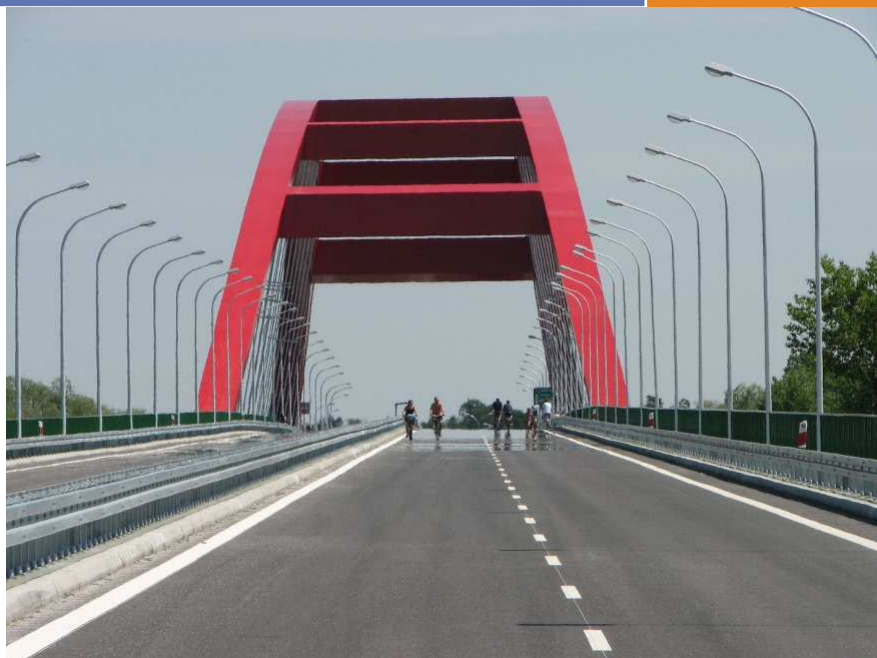
Zespół Technologii Materiałów i Nawierzchni Drogowych



2013

„Rozwiązania materiałowo-technologiczne izolacji i nawierzchni obiektów mostowych”

Raport końcowy



Opracowanie pod kierunkiem

Prof. dr hab. inż. Piotra Radziszewskiego

Zleceniodawca:

**Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i
Autostrad**

ul. Żelazna 59, Warszawa

Warszawa, listopad 2013

Wykonawcy (Politechnika Warszawska):

Prof. dr hab. inż. Piotr Radziszewski – kierownik projektu

Prof. dr hab. inż. Jerzy Piłat

Dr inż. Michał Sarnowski

Dr inż. Karol Kowalski

Dr inż. Jan Król

Mgr inż. Piotr Pokorski

Mgr inż. Adam Liphardt

Współpraca badawcza:

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie:

Prof. dr hab. inż. Bogusław Stefańczyk

Dr inż. Paweł Mieczkowski

Dr inż. Stanisław Majer

Instytut Techniki Budowlanej (ITB)

Dr inż. Barbara Francke

Politechnika Białostocka

Dr inż. Andrzej Plewa

Politechnika Warszawska:

Dr hab. inż. Lesław Kwaśniewski prof. PW

Dr hab. inż. Artur Zbiciak prof. PW

Mgr inż. Rafał Michałczyk

Inż. Marcin Balcerzak

Michał Gleba

Krzysztof Rusiniak (pracownik techniczny PW)

Inż. Krzysztof Burkot

Inż. Jacek Jabłoński

Spis treści

ZAKRES I CEL PRACY	5
1 ANALIZA STOSOWANYCH ROZWIĄZAŃ TECHNICZNYCH IZOLACJI I NAWIERZCHNI NA POMOSTACH BETONOWYCH I STAŁOWYCH OBIEKTÓW MOSTOWYCH W ODNIESIENIU DO DOŚWIADCZEŃ KRAJOWYCH I ZAGRANICZNYCH ORAZ NORM I PRZEPISÓW TECHNICZNYCH.....	7
1.1 Konstrukcja nawierzchni na drogowych obiektach mostowych	7
1.2 Rozwiązania materiałowo-technologiczne izolacji mostowych	9
1.3 Rozwiązania materiałowo-technologiczne warstw nawierzchni mostowych.....	14
2 ANALIZA SZCZEGÓLNYCH WARUNKÓW PRACY IZOLACJI I KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI MOSTOWYCH	16
2.1 Ogólna charakterystyka szczególnych warunków pracy nawierzchni mostowej	16
2.2 Analiza stanu naprężeń i odkształceń konstrukcji nawierzchni mostowej.....	19
2.2.1 Wprowadzenie.....	19
2.2.2 Zakres pracy	19
2.2.3 Opracowanie modeli numerycznych.....	20
2.2.4 Opracowanie modeli mieszanek mineralno-asfaltowych.....	31
2.2.5 Wyniki obliczeń	40
3 CHARAKTERYSTYKA PODSTAWOWYCH RODZAJÓW ZNISZCZEŃ IZOLACJI I NAWIERZCHNI MOSTOWEJ ORAZ ANALIZA PRZYCZYN ICH POWSTAWANIA	65
3.1 Charakterystyka szczególnych warunków pracy izolacji i nawierzchni mostowej w aspekcie możliwości powstawania zniszczeń	65
3.2 Analiza zniszczeń nawierzchni na przykładzie wybranych obiektów mostowych.....	66
3.2.1 Most w Sztabinie na drodze krajowej nr 8.....	66
3.2.2 Kładka nad Kanałem Augustowskim w Augustowie na drodze krajowej nr 8.....	70
3.2.3 Most gen. Stefana Grota-Roweckiego.....	73
4 OCENA WPŁYWU ODDZIAŁYWANIA TEMPERATURY TECHNOLOGICZNEJ NA TRWAŁOŚĆ MATERIAŁÓW STOSOWANYCH DO WARSTW IZOLACJI I WARSTW NAWIERZCHNI.....	79
4.1 Badanie asfaltu i asfaltu modyfikowanego stosowanego do izolacji i nawierzchni mostowej przed i po oddziaływaniu wysokiej temperatury technologicznej wytwarzania i układania mieszanki mineralno-asfaltowej.....	80
4.1.1 Wymagania i klasyfikacja lepiszczy asfaltowych wg europejskich wymagań (EN) z uwzględnieniem szczególnych warunków krajowych	80
4.1.2 Materiały do badań	84
4.1.3 Program badań lepiszczy.....	86
4.1.4 Wyniki badań lepiszczy.....	88
4.2 Badania odporności papy stosowanej do wykonywania izolacji mostowej na oddziaływanie wysokiej temperatury technologicznej.....	102
4.2.1 Wymagania odnośnie asfaltowych pap zgrzewalnych	102
4.2.2 Materiały do badań	104
4.2.3 Program badań pap zgrzewalnych	104
4.2.4 Wyniki badań pap zgrzewalnych	104
4.3 Badanie odporności na wysokie temperatury technologiczne izolacji z asfaltu lanego, mastyksu tradycyjnego, mastyksu ze zwiększoną zawartością frakcji grysowej oraz nawierzchni z betonu asfaltowego i mastyksu grysowego SMA.....	111
4.3.1 Izolacja z asfaltu lanego (MA).....	111
4.3.2 Izolacja z mastyksu (tradycyjnego).....	128

4.3.3	Izolacja z mastyksu o zwiększonej zawartości frakcji grysowej (SMA/MA).....	137
4.4	Badanie odporności na wysokie temperatury technologiczne betonu asfaltowego AC, mastyksu grysowego SMA i asfaltu lanego MA do warstwy ochronnej i warstwy ścieralnej.....	150
4.4.1	Warstwa ochronna/warstwa ścieralna z asfaltu lanego (MA).....	150
4.4.2	Warstwa ochronna/warstwa ścieralna z mastyksu grysowego (SMA).....	161
4.4.3	Warstwa ochronna/warstwa ścieralna z betonu asfaltowego (AC).....	173
4.5	Porównanie badań zmęczeniowych - modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych z betonu asfaltowego (AC), mastyksu grysowego (SMA) i mastyksu wysokogrysowego (SMA/MA).....	186
4.5.1	Trwałość zmęczeniowa – metodyka badawcza.....	186
4.5.2	Wyniki badań trwałości zmęczeniowej.....	190

5 OCENA WPŁYWU ODDZIAŁYWANIA WODY I ŚRODKÓW ODLADZAJĄCYCH, STARZENIA MATERIAŁÓW I OBCIĄŻEŃ RUCHEM POJAZDÓW, NA WŁAŚCIWOŚCI FUNKCJONALNE IZOLACJI I NAWIERZCHNI W ZAKRESIE TEMPERATURY EKSPLOATACYJNEJ 195

5.1	Badanie asfaltu i asfaltu modyfikowanego stosowanego do izolacji i nawierzchni przed i po starzeniu RTFOT i PAV.....	196
5.2	Badanie odporności izolacji z papy zgrzewalnej na oddziaływanie wody, środków odladzających i starzenie.....	220
5.2.1	Wymagania odnośnie asfaltowych pap zgrzewalnych.....	220
5.2.2	Materiały do badań.....	222
5.2.3	Program badań pap zgrzewalnych.....	222
5.2.4	Wyniki badań pap zgrzewalnych.....	222
5.3	Badanie odporności na starzenie izolacji z asfaltu lanego, mastyksu tradycyjnego i mastyksu ze zwiększoną zawartością frakcji grysowej.....	228
5.3.1.	Izolacja z asfaltu lanego (MA).....	228
5.3.2.	Izolacja z mastyksu (tradycyjnego).....	235
5.3.3.	Izolacja z mastyksu o zwiększonej zawartości frakcji grysowej (SMA/MA).....	240
5.4	Badanie odporności na starzenie, oddziaływanie wody i środków odladzających betonu asfaltowego AC, mastyksu grysowego SMA i asfaltu lanego MA do warstwy ochronnej i warstwy ścieralnej.....	251
5.3.4.	Warstwa ochronna/warstwa ścieralna z asfaltu lanego (MA).....	251
5.3.5.	Warstwa ochronna/warstwa ścieralna z mastyksu grysowego (SMA).....	259
5.3.6.	Warstwa ochronna/warstwa ścieralna z betonu asfaltowego (AC).....	268

6 OPRACOWANIE ZALECEŃ DOTYCZĄCYCH STOSOWANIA ROZWIĄZAŃ MATERIAŁOWO-TECHNOLOGICZNYCH IZOLACJI I NAWIERZCHNI MOSTOWYCH ODPORNYCH NA ZMĘCZENIE, KOLEINOWANIE, DZIAŁANIE WODY ORAZ TEMPERATURY 277

6.1	Zalecenia dotyczące stosowania rozwiązań materiałowo-technologicznych izolacji przeciwwodnych płyt pomostów obiektów mostowych.....	277
6.2	Zalecenia dotyczące stosowania rozwiązań materiałowo-technologicznych warstw nawierzchni obiektów mostowych.....	289
6.3	Zalecenia dotyczące układu warstw konstrukcyjnych nawierzchni na obiektach mostowych.....	299

7 WNIOSKI..... 323

8 LITERATURA 325

Rozwiązania materiałowo-technologiczne izolacji i nawierzchni obiektów mostowych

RAPORT KOŃCOWY

ZAKRES I CEL PRACY

Celem projektu badawczego jest opracowanie rozwiązań materiałowo-technologicznych izolacji i nawierzchni mostowych, trwałych i odpornych na działanie ruchu samochodowego i środowiska.

Program projektu opracowano biorąc pod uwagę aktualny stan wiedzy opracowany na podstawie literatury krajowej i zagranicznej oraz dorobek własny Zespołu w zakresie badań lepiszczy i lepiszczy modyfikowanych, mieszanek mineralno-asfaltowych, wyrobów stosowanych do zabezpieczeń przeciwwodnych w budownictwie mostowym.

Program pracy realizowany w latach 2011- 2013 dotyczył następujących zadań:

1. Analiza stosowanych rozwiązań technicznych izolacji i nawierzchni na pomostach betonowych i stalowych obiektów mostowych w odniesieniu do doświadczeń krajowych i zagranicznych oraz norm i przepisów technicznych.
2. Analiza szczególnych warunków pracy izolacji i konstrukcji nawierzchni obiektów mostowych.
3. Charakterystyka podstawowych rodzajów zniszczeń izolacji i nawierzchni mostowej oraz analiza przyczyn ich powstawania.
4. Ocena wpływu oddziaływania temperatury technologicznej na trwałość materiałów stosowanych do warstw izolacji i warstw nawierzchni.
5. Oceny wpływu oddziaływania wody i środków odfadających, starzenia materiałów i obciążeń ruchem pojazdów na właściwości funkcjonalne izolacji i nawierzchni w zakresie temperatury eksploatacyjnej.
6. Opracowanie zaleceń dotyczących stosowania rozwiązań materiałowo-technologicznych izolacji i nawierzchni mostowych odpornych na zmęczenie, koleinowanie, działanie wody oraz temperatury.
7. Wnioski.

Głównym wykonawcą projektu jest Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Dróg i Mostów, Zespół Technologii Materiałów i Nawierzchni Drogowych.

W realizacji projektu, w ramach współpracy badawczej wzięli udział:

- w zadaniu 2, punkt 2.2. Zespół prof. PW Lesława Kwaśniewskiego z Zakładu Mechaniki Teoretycznej, Wydział IL PW;
- w zadaniu 4, punkt 4.2. i w zadaniu 5, punkt 5.2. dr inż. Barbara Franke z Zakładu Materiałów Budowlanych Instytutu Techniki Budowlanej,

- w zadaniu 4, punkt 4.5. – współpraca przy analizie wyników badań trwałości zmęczeniowej – dr inż. Andrzej Plewa z Zakładu Inżynierii Drogowej Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej;
- w zadaniu 6 prof. Bogusław Stefańczyk, dr inż. Paweł Mieczkowski i dr inż. Stanisław Majer z Zakładu Dróg i Mostów Katedry Dróg, Mostów i Materiałów Budowlanych Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

1 ANALIZA STOSOWANYCH ROZWIĄZAŃ TECHNICZNYCH IZOLACJI I NAWIERZCHNI NA POMOSTACH BETONOWYCH I STALOWYCH OBIEKTÓW MOSTOWYCH W ODNIESIENIU DO DOŚWIADCZEŃ KRAJOWYCH I ZAGRANICZNYCH ORAZ NORM I PRZEPISÓW TECHNICZNYCH

1.1 Konstrukcja nawierzchni na drogowych obiektach mostowych

Prawidłowo zaprojektowana i wykonana nawierzchnia na obiekcie mostowym powinna posiadać następujące właściwości eksploatacyjne [1, 2]:

- szczelna, odporna na wodę i środki odladzające,
- stabilna, odporna na odkształcenia płyty pomostu,
- trwała, w zróżnicowanych temperaturach eksploatacyjnych zapewniać długi okres użytkowania,
- odporna na spękania termiczne i zmęczeniowe w niskich i średnich temperaturach eksploatacyjnych oraz odporna na koleinowanie w wysokich temperaturach eksploatacyjnych,
- odporna na działanie naprężeń ścinających,
- szorstka, zapewniając tym samym komfort jazdy i bezpieczeństwo ruchu,
- dobrze związana z izolacją oraz płytą pomostu,
- lekka, przy zachowaniu odpowiedniej grubości zapewniającej ochronę płyty pomostu.

Analizując trwałość całej konstrukcji obiektu mostowego należy stwierdzić, że elementem decydującym o zachowaniu się konstrukcji w czasie, jest trwałość nawierzchni mostowej.

Nawierzchnia jest elementem mostu decydującym w dużej mierze o trwałości obiektu inżynierskiego. Pracuje ona w bardzo specyficznych warunkach obciążenia. Nawierzchnia mostowa poddawana jest obciążeniom od ruchu pojazdów samochodowych i czynników klimatycznych. Według [3] nawierzchnia mostowa powinna spełniać następujące funkcje:

- rozkładać obciążenia na pomost,
- tłumić efekty dynamiczne obciążeń ruchowych,
- mieć dobrą przyczepność do podłoża,
- przejmować odkształcenia płyty pomostu wywołane zmianami temperatury w przedziale od -30°C do $+60^{\circ}\text{C}$ oraz działaniem obciążeń,
- być równa i szorstka,
- być odporna na ścieranie, spękania niskotemperaturowe i zmęczeniowe oraz na powstawanie kolein.

Do zadań nawierzchni na obiekcie inżynierskim należy, oprócz zapewnienia dogodnych i bezpiecznych warunków poruszania się pojazdów, również ochrona pomostu przed działaniem wody i środków odladzających.

Na obiektach mostowych możliwe jest wykonywanie nawierzchni w technologii asfaltowej lub z betonu cementowego. W Polsce i w Europie powszechnie stosuje się nawierzchnie asfaltowe. Technologia wykonywania nawierzchni na obiektach mostowych z betonów cementowych nie znalazła uznania w Europie. Nawierzchnie mostowe betonowe są powszechnie stosowanym rozwiązaniem materiałowo-technologicznym w USA a nawierzchnie asfaltowe są rzadko stosowane. Za jedną z przyczyn unikania asfaltowych nawierzchni mostowych w USA podaje się możliwość przenikania wody przez

konwencjonalne warstwy z mieszanek mineralno-asfaltowych, które na mostach nie mogą być zagęszczane wibracyjnie [4].

Trwałość nawierzchni mostowej zależy od dwóch czynników: obciążenia od ruchu pojazdów samochodowych oraz czynników klimatycznych. W warunkach klimatu środkowo-europejskiego na nawierzchnie mostowe działają, poza oddziaływaniem ruchu, niska temperatura, woda oraz środki odladzające [2].

Jak wykazują badania prowadzone na świecie [5] najczęstsze czynniki wpływające na obniżenie trwałości nawierzchni mostowych związane są z pękaniem termicznym i zmęczeniowym warstw oraz brakiem zapewnienia odpowiedniego połączenia płyty pomostu z nawierzchnią. Tego rodzaju zjawiska są szczególnie widoczne na ortotropowych płytach stalowych.

Na pomostach obiektów mostowych układa się warstwę izolacji po uprzednim zagruntowaniu podłoża a następnie wykonuje się nawierzchni, która składa się z warstwy ochronnej i warstwy ścieralnej.

Schemat układu warstw konstrukcyjnych nawierzchni asfaltowych na drogowych obiektach mostowych na pomoście stalowym i betonowym przedstawiono na rys. 1-1 [6].



Rys.1-1. Układ warstw konstrukcji nawierzchni na pomoście [6]

Nawierzchnia asfaltowa układana na izolacji składa się z warstwy ścieralnej i ochronnej. Warstwa ochronna poza obiektem mostowym w konstrukcji nawierzchni położonej na korpusie ziemnym nosi nazwę warstwy wiążącej. Warstwa ochronna nawierzchni mostowej ma na celu zabezpieczenie izolacji przed uszkodzeniem podczas wykonywania górnej warstwy nawierzchni i później podczas eksploatacji. Warstwa ścieralna nawierzchni mostowej pełni podobną rolę jak w nawierzchni na korpusie ziemnym, lecz ze względu na szczególne warunki obciążenia (szybsze zmęczeniowe zniszczenie nawierzchni na obiekcie mostowym) oraz rolę jaką pełni na obiekcie mostowym powinna mieć strukturę szczelną i zamkniętą.

Warunki klimatyczne panujące w Polsce i w większości krajów europejskich, w postaci wielu przejść przez zero w ciągu roku (w Polsce ponad 100 przejść), uniemożliwiają budowę szczelnych, zamkniętych i trwałych nawierzchni mostowych bez wykonania warstwy hydroizolacyjnej.

1.2 Rozwiązania materiałowo-technologiczne izolacji mostowych

Możliwe są dwa systemy ochrony konstrukcji przed korozją. Pierwszy polegający na użyciu materiałów odpornych na działanie czynników agresywnych. W tym systemie nie wykonuje się izolacji pomostu. Tego typu rozwiązanie stosowane jest głównie w USA.

Drugi system polega na niedopuszczeniu czynników agresywnych do konstrukcji, przez wykonanie warstwy izolacyjnej. Tego rodzaju rozwiązanie powszechnie jest stosowane w Europie [7].

Izolacja przeciwwodna (hydroizolacja) jest to cienka warstwa odpowiednio wytrzymałego materiału, nienasiąkliwa, nieprzepuszczalna dla wody, układana na powierzchniach poziomych i pionowych drogowych obiektów inżynierskich [8]. Izolacje powinny się charakteryzować następującymi właściwościami:

- wodoszczelnością oraz odpornością na działanie wody pod ciśnieniem,
- dobrą przyczepnością do podłoża i do nawierzchni układanej na izolacji,
- odpowiednią wytrzymałością w szerokim zakresie temperatur od -30°C do $+70^{\circ}\text{C}$,
- elastycznością,
- odpornością cieplną,
- wysoką trwałością i odpornością na starzenie (odporność na zmiany właściwości fizycznych i mechanicznych w czasie),
- łatwością stosowania,
- możliwością ułożenia nawierzchni bezpośrednio na izolacji.

Stosowanie warstwy izolacyjnej na obiekcie mostowym wymaga uwzględnienia następujących czynników [7]:

- projektu konstrukcji obiektu, pozwalającego na określenie stref ściskania i rozciągania,
- rodzaju materiałów pomostu obiektu - zlecane jest stosowanie betonów o wysokich i bardzo wysokich parametrach technicznych,
- lokalizacji obiektu – systematyczne stosowanie w polskim klimacie odpowiedniego zimowego utrzymania.

Pierwszymi zastosowaniami warstw izolacyjnych na mostach były warstwy mastyksu asfaltowego o grubości 5 do 8 mm. Z czasem do warstwy izolacji dodano dodatkową warstwę ochronną z asfaltu lanego lub piaskowego o grubości około 15 mm z grysem 10/12 zwiększającym odporność na odkształcenia. Stopniowo zwiększano grubość warstwy ochronnej z asfaltu lanego i ostatecznie stosowano warstwę mastyksu i asfaltu lanego o grubości 8+22 mm lub 4+26 mm.

Zalety asfaltowych rozwiązań materiałowo-technologicznych zostały następnie wykorzystane przez stosowanie izolacji w tak zwanym systemie mieszanym. Taki system składał się z materiału rolowego w dolnej warstwie i asfaltu lanego pokrytego grysem jako warstwy ochronnej. pap klejonych na lepiku oraz pap termozgrzewalnych, które w mniejszym stopniu obciążały konstrukcję obiektu.

Wieloletnie obserwacje izolacji asfaltowych potwierdziły, że asfalt z biegiem czasu w bardzo małym stopniu ulega starzeniu a próbki po 10 latach eksploatacji nie wykazują praktycznie zmian.

Rozwiązaniem stosowanym na pomostach mostów stalowych w Europie i w niektórych stanach USA jest wykonanie pomiędzy pomostem a warstwami nawierzchni z mieszanki mineralno-asfaltowej,

specjalnej warstwy izolacyjnej. Najczęściej tego rodzaju warstwy wykonywane są w następujących rozwiązaniach materiałowo-technologicznych [5]:

- asfalt lany - mieszanka mineralno-asfaltowa na gorąco stosowana na wielu mostach w Wielkiej Brytanii i w Polsce,
- Gussasphalt – mieszanka mineralno-asfaltowa stosowana przede wszystkim w Niemczech, o składzie i właściwościach podobnych do asfaltu lanego,
- warstwy asfaltowo-epoksydowe,
- warstwy polimerowo-epoksydowe,
- warstwy poliuretanowe,
- beton asfaltowy z asfaltem modyfikowanym polimerem,
- warstwy absorbujące naprężenia SAMI z lepiszczem gumowo-asfaltowym,
- beton asfaltowy z asfaltem modyfikowanym polimerem z włóknami stalowymi,
- izolacje arkuszowe składające się z osnowy poliestrowej, z włókien szklanych, lepiszcza asfaltowego i rozdrobnionej gumy.

Jak dowodzą badania prowadzone w Europie i na świecie [1] bardzo korzystne właściwości na pomostach stalowych wykazują warstwy asfaltowo-epoksydowe oraz inne rozwiązania wykorzystujące dodatek polimeru i rozdrobnionej gumy. Należy jednak zawsze rozważyć aspekty ekonomiczne danego rozwiązania.

W Europie i w Polsce powszechne jest układanie na zagruntowanym podłożu warstwy izolacji a następnie asfaltowych warstw nawierzchni (rys. 1-1). Nawierzchnie wraz z izolacją tworzą system nawierzchniowy. System ten jest najczęściej stosowanym rozwiązaniem materiałowo-technologicznym stosowanym na obiektach mostowych stalowych i betonowych.

Wykonywanie na obiektach mostowych warstwy izolacji pomostów i nawierzchni jest technologią trwałą, gwarantującą bezpieczne warunki ruchu i odpowiedni komfort jazdy, przy założeniu bezwzględного przestrzegania reżimów technologicznych, rozległej kontroli materiałów i wnikliwego nadzoru budowlanego [9]. Stosowanie obecnie do systemów nawierzchniowych (izolacja + nawierzchnia) lepiszczy modyfikowanych polimerem wymusza przestrzeganie ostrych wymagań technicznych wykonania a szczególnie nie przekraczania dopuszczalnych temperatur technologicznych, które według zaleceń producentów polimerów i technologów powinny być w granicach około 200°C. Liczne awarie asfaltowych systemów nawierzchniowych zawierających polimeroasfalty spowodowane były nie przestrzeganiem wymagań temperaturowych. Autorzy referatu mieli na celu zwrócenie szczególnej uwagi na ten ważny aspekt decydujący o trwałości mostowego systemu nawierzchniowego.

Rozwiązania materiałowo-technologiczne zalecane do stosowania przy wykonywaniu izolacji pomostów obiektów mostowych w Polsce przedstawiono na rys. 1-2.

Izolacje przeciwwodne stosowane są najczęściej w postaci materiałów arkuszowych lub jako materiały powłokowe. Do materiałów arkuszowych zaliczamy w szczególności:

- papy grzewalne,
- papy samoprzylepne.

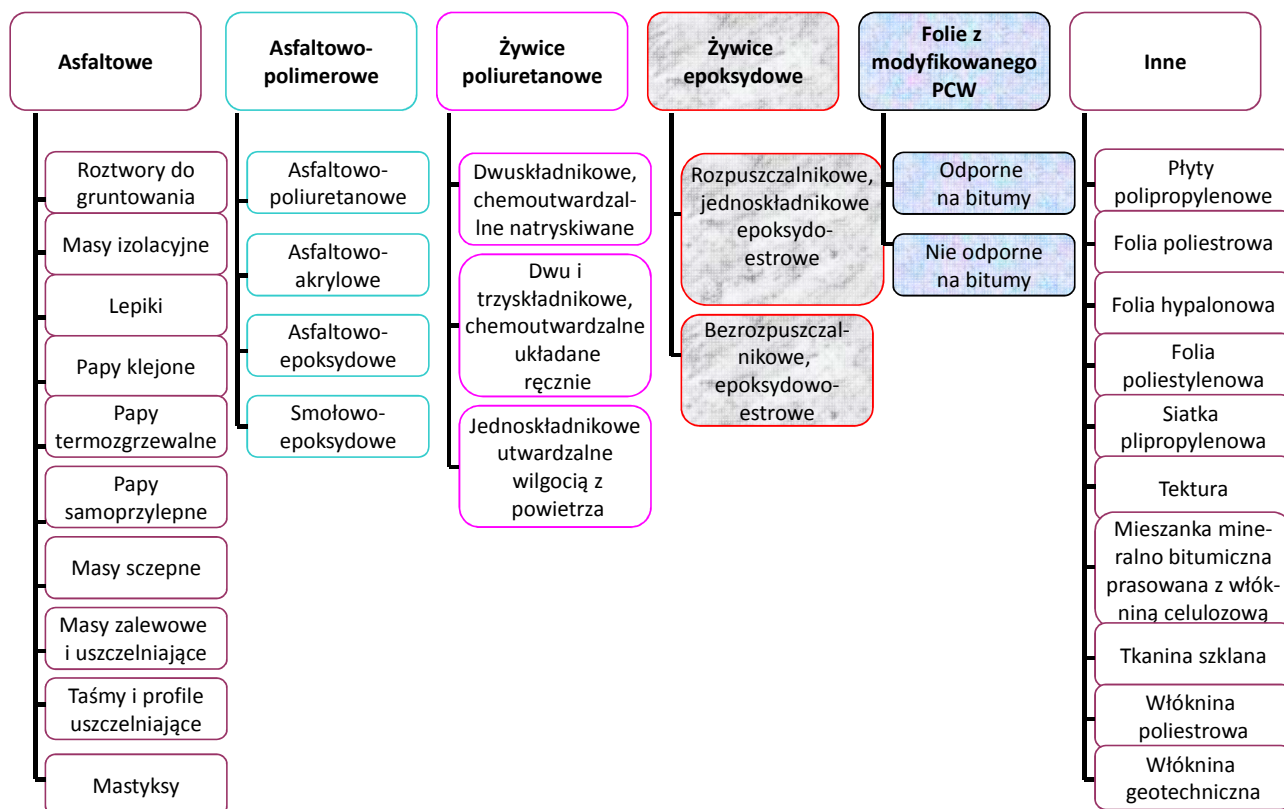
Do materiałów powłokowych zaliczamy w szczególności:

- poliuretanowe izolacje natryskowe,
- izolacje z metakrylanu metylu,
- izolacje z zapraw cementowo-polimerowych,
- izolacje z asfaltowych mas stosowanych na zimno lub na gorąco,
- izolacje z masy asfaltowo-polimerowej,

- izolacje ze zmiękczonej żywicy epoksydowej,
- izolacje z mastyksu.

Systemy izolacji wymagają stosowania warstw ochronnych, które zabezpieczają wykonaną cienką izolację przed mechanicznymi uszkodzeniami podczas wykonywania dalszych prac budowlanych lub remontowych oraz w czasie eksploatacji.

Rodzaje materiałów stosowanych do hydroizolacji obiektów mostowych przedstawiono na rys. 1-2 [8].



Rys. 1-2. Materiały stosowane do hydroizolacji pomostów [8]

Nowym rozwiązaniem materiałowo-technologicznym są izolacionawierzchnie. Izolacionawierzchnie są to powłoki o grubości od 3 do 12 mm układane na powierzchni jezdni i chodników mostowych, które pełnią jednocześnie funkcję izolacji i nawierzchni. Izolacionawierzchnie wykonywane są przy zastosowaniu następującego spoiwa: epoksydowego, epoksydowo-poliuretanowego, metakrylanowego i cementowo-poliuretanowego. Podstawowe wymagania dla izolacionawierzchni to: wodoszczelność, dobra przyczepność do podłoża, mrozoodporność, odporność na ścieranie, szorstkość, odporność na oddziaływanie środowiska, odporność na środki odladzające, trwałość [8].

Hydroizolacje arkuszowe (papy termozgrzewalne, papy samoprzylepne) są obecnie najczęściej stosowanymi powłokami do zabezpieczenia powierzchni pomostów. Zabezpieczenia w postaci pap charakteryzują się prostotą wykonania oraz dużą skutecznością odnośnie zabezpieczenia obiektu. Izolację wykonuje się przez przyklejenie arkuszy papy na przygotowanym i zagruntowanym podłożu w jednej lub dwóch warstwach. Stosowane są dwa rodzaje środków gruntujących: środki gruntujące asfaltowe do gruntowania pomostów betonowych (w przypadku stosowania emulsji asfaltowej, ze względu na możliwość korozji stali zbrojeniowej w podłożu betonowym, nie może ona zawierać chlorków) i środki gruntujące żywiczne do gruntowania podłoża betonowych i stalowych. Roboty izolacyjne powinny być wykonywane bardzo starannie przez wyspecjalizowane brygady dysponujące doświadczeniem oraz odpowiednim sprzętem.

Z doświadczeń krajowych i zagranicznych [3, 10, 11] wynika, że złe wykonawstwo izolacji arkuszowych związane jest z następującymi czynnikami:

- niewłaściwe przygotowanie podłoża (niedokładne usunięcie mleczka cementowego, zapylenie, nierówności podłoża, niewłaściwie wykonanie gruntowania podłoża). Zawilgocone, nie wysuszone podłoże, które zostało zagruntowane może być przyczyną powstawania pęcherzy w warstwie izolacyjnej i na jej powierzchni,
- nieprzestrzeganie warunków technicznych i wymagań w zakresie właściwego wykonania izolacji:
 - wykonanie izolacji na zawilgoconym podłożu,
 - niedoklejenie papy do podłoża,
 - przegrzanie papy,
 - złe zgrzanie styków.

Innym rodzajem izolacji często stosowanym na obiektach mostowych jest mastyks asfaltowy. Izolacja z mastyksu asfaltowego polega na wykonaniu cienkiej warstwy składającej się z wypełniacza i drobnego kruszywa z dużą zawartością lepiszcza asfaltowego. Izolację z mastyksu wykonuje się wyłącznie na poziomych powierzchniach mostów drogowych, ale przede wszystkim na pomostach stalowych oraz betonowych gdzie nie występuje możliwość zarysowania podłoża [8]. Powierzchnię gorącego mastyksu należy posypać grysem frakcji 2-5 mm.

Mastyks asfaltowy charakteryzuje się brakiem wolnych przestrzeni, doskonałym powiązaniem z podłożem i warstwą ochronną. Izolacja z mastyksu asfaltowego dobrze wypełnia drobne nierówności podłoża betonowego. Niebezpieczne jest wyrównywanie większych nierówności grubą warstwą mastyksu, gdyż może to powodować, szczególnie przy wyższej zawartości asfaltu, powstawanie nadmiernych odkształceń trwałych nawierzchni mostowej. Według doświadczeń niemieckich należy unikać stosowania grubszych niż 10 mm warstw z mastyksu asfaltowego. Ze względu na stabilność warstwy mastyksu i możliwości przenikania lepiszcza do warstwy ochronnej należy ograniczyć zawartość lepiszcza w mastyksie do 16% oraz stosować dodatek asfaltu naturalnego Trinidad - Epuré.

Aby wyeliminować wadę mastyksu dotyczącą niebezpieczeństwa przesuwów i plastycznych odkształceń można stosować izolację z asfaltu piaskowego [12]. Jednak izolacja z asfaltu piaskowego nie jest tak szczelna jak izolacja z mastyksu ponieważ zawartość wolnych przestrzeni w mieszanke wynosi około 3%.

Innym rodzajem izolacji stosowanym niezbyt często w Polsce jest poliuretanowa izolacja natryskowa. Izolacja ta jest wykonywana z płynnego poliuretanu metodą natryskową na zagruntowanym podłożu betonowym lub stalowym. Jako materiał do gruntowania podłoża stosuje się żywice epoksydowe charakteryzujące się dobrą przyczepnością do podłoża. Grubość wykonywanej izolacji nie powinna być mniejsza niż 2 mm na chodnikach i powierzchniach pionowych i 2.5 mm na jezdni. Izolacja poliuretanowa powinna być wykonywana przy optymalnych warunkach atmosferycznych, tj. podłoże nie może być przemarznęte, temperatura powietrza obiektu powinna być powyżej 8°C i nie wyżej od 30°C, wymagana jest wilgotność powietrza poniżej 85% a wilgotność podłoża betonowego poniżej 5%.

Zaletą tego rodzaju izolacji jest możliwość nanoszenia tej izolacji na podłoża poziome i pionowe. Dobrze wykonana warstwa izolacji poliuretanowej powinna być dobrze związana z podłożem, nienasiąkliwa. Do wad izolacji poliuretanowych należy:

- wykonanie izolacji jest możliwe w niewielkiej liczbie dni w roku (ze względu na temperaturę i wilgotność),
- twardnienie powłoki poliuretanowej w niskiej temperaturze ulega spowolnieniu przez co reakcja może nie przebiec do końca przed ułożeniem warstwy ochronnej i w efekcie mogą powstać otwarte pory oraz spadek przyczepności izolacji do podłoża,

- powiązanie warstw izolacji i warstwy ochronnej asfaltowej, różniących się między sobą pod względem chemicznym, jest problematyczne i wymaga stosowania warstwy szepnej,
- warstwa izolacja z płynnej żywicy może zawierać do 15% wolnej przestrzeni, które mogą wypełniać się wodą i w zależności od temperatury i ciśnienia powodować uszkodzenia izolacji i warstwy ochronnej.

Wadliwie wykonana izolacja jest przyczyną obniżenia trwałości konstrukcji i poza dodatkowymi nakładami finansowymi na remonty, generuje znaczące koszty społeczne ponoszone przez wszystkich użytkowników dróg przez wydłużenie czasu jazdy ze względu na konieczność korzystania z objazdów remontowanych obiektów oraz związanych z tym wyższych kosztów eksploatacji.

1.3 Rozwiązania materiałowo-technologiczne warstw nawierzchni mostowych

Nawierzchnia asfaltowa na obiektach mostowych składa się z warstwy ochronnej i ścieralnej. Warstwy te wykonuje się najczęściej z asfaltu lanego MA, betonu asfaltowego AC i mastyksu grysowego SMA. Ze względu na szczególne warunki obciążenia na obiekcie mostowym preferowane są mieszanki mineralno-asfaltowe o dużej zawartości mastyksu i o strukturze zamkniętej. Wyróżniają się tu mieszanki asfaltu lanego i SMA do warstwy ochronnej i mieszanki asfaltu lanego, SMA, mieszanki o nieciągłym uziarnieniu BBTM do warstwy ścieralnej [13, 14, 15].

Możliwe jest stosowanie układu warstw nawierzchni mostowych z następującymi mieszankami mineralno-asfaltowymi:

- warstwa ochronna z asfaltu lanego MA, warstwa ścieralna z mastyksu grysowego SMA,
- warstwa ochronna i warstwa ścieralna z mastyksu grysowego SMA,
- warstwa ochronna i warstwa ścieralna z asfaltu lanego, MA
- warstwa ochronna z asfaltu lanego MA i warstwa ścieralna z betonu asfaltowego AC,
- warstwa ochronna i ścieralna z betonu asfaltowego AC.

Zalecenia zawarte w wymaganiach technicznych dla mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do warstwy ochronnej i ścieralnej produkowanych na gorąco oraz warunki ich produkcji zostały opracowane przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA) i przedstawione w Wymaganiach Technicznych WT-2 [N1]. Wymagania te są w ostatnich latach często weryfikowane a ostatnia ich wersja z 2013 roku nie zaleca stosowania polimeroasfaltów do mieszanek mineralno-asfaltowych asfaltu lanego, wymagających wysokich temperatur wygrzewania. Polimeroasfalty zastąpiono asfaltem wielorodzajowym 35/50 ze względu na wyższą odporność tego rodzaju asfaltu na wysokie temperatury technologiczne.

Obecnie WT-2: 2013 zaleca stosowanie do warstwy ochronnej izolacji mostowej asfalt lany MA 8 i MA 11 wyłącznie z asfaltem 35/50 lub z asfaltem wielorodzajowym 35/50.

Do warstwy ścieralnej nawierzchni mostowej zaleca się stosować:

- asfalt lany MA 8 i MA 11 (z asfaltem 35/50 lub asfaltem wielorodzajowy 35/50),
- mastyks grysowy SMA 5, 8 i 11,
- beton asfaltowy do bardzo cienkich warstw BBTM 8 i 11,
- beton asfaltowy AC 1S.

Do mieszanek typu SMA, BBTM i AC wymagania przewidują również stosowanie asfaltów modyfikowanych polimerami:

- PmB 45/80-55,
- PmB 45/80-65,
- PmB 65/105-60.

Do warstwy ścieralnej zaleca się stosowanie dodatku asfaltu naturalnego „Trinidad” w ilości 1,5 do 2,0% w stosunku do masy asfaltu, który poprawia odporność na powstawanie odkształceń trwałych, ogranicza procesy starzeniowe, zwiększa odporność na spękania zmęczeniowe i niskotemperaturowe oraz zwiększa szorstkość.

Grubość nawierzchni mostowej nie jest projektowana ze względu obciążenie ruchem, tak jak to ma miejsce w przypadku wymiarowania nawierzchni na korpusie ziemnym. Nie wyznacza się trwałości zmęczeniowej nawierzchni, gdyż przyjmuje się, że jest ona spełniona na obiekcie mostowym przez samą konstrukcję mostu. Tradycyjnie bezpieczne rozwiązanie stanowi układ dwóch warstw o grubości każdej warstwy około 4 cm. Dobrym rozwiązaniem jest stosowanie warstwy ścieralnej o zmniejszone grubości do 2 cm, np. z mieszanki o nieciąglym uziarnieniu. Stosowanie grubych nawierzchni jest niekorzystne z punktu widzenia projektanta dążącego do zmniejszenia ciężaru własnego konstrukcji mostu. Stosowanie cienkich nawierzchni jest dopuszczalne, gdy warstwy konstrukcyjne będą zbudowane z materiału wykazującego zwiększoną zdolność relaksacji naprężeń i odkształceń w niskiej temperaturze oraz odpowiednią sztywność w wysokiej temperaturze. Najnowszym rozwiązaniem materiałowo-technologicznym jest stosowanie izolacjonawierzchni, które pełnią rolę jednocześnie izolacji i nawierzchni a ich grubość jest w zakresie od kilku do kilkunastu milimetrów.

Trwałe i bezpieczne nawierzchnie mostowe wymagają właściwego doboru materiałów, odpowiedniej technologii i wykonawstwa na najwyższym poziomie. Można to osiągnąć między innymi stosując lepszycza modyfikowane, nowe technologie takie jak: mastyks grysowy SMA, asfalty lane z lepiszczami modyfikowanymi o zwiększonej odporności na odkształcenia trwałe, cienkie warstwy o nieciąglym uziarnieniu BBTM oraz inne nowe rozwiązania materiałowo-technologiczne izolacji i nawierzchni z lepiszczami polimerowymi.

Porównując stosowane rozwiązania materiałowo-technologiczne na obiektach mostowych w świecie, należy stwierdzić, że w odróżnieniu od Europy w Stanach Zjednoczonych większość nawierzchni obiektów mostowych wykonuje się w technologii betonu cementowego. W USA uzasadnia się to prostszym wykonawstwem nawierzchni betonowych oraz możliwością wykonania całości robót przez jedną firmę. Na nawierzchnie obiektów mostowych stosuje się następujące rodzaje mieszanek [3]:

- beton modyfikowany polimerami, głównie dodatkiem emulsji lateksowej (Latex Modified Concrete), która uszczelnia beton przez wytworzenie nieprzepuszczalnej warstwy w związanym betonie cementowym,
- beton o niskim w/c (Low Slump Concrete) z dużą zawartością cementu (około 470 kg/m³ o w/c=0.3),
- beton z dodatkiem popiołu lotnego (High Performance Fly Ash Concrete),
- beton z dodatkiem mikrokrzemionki (High Performance Silica Fume Concrete).

W przypadku stosowania betonów wysokowartościowych nie wykonuje się na obiekcie mostowym izolacji oraz nawierzchniowych warstw mostowych.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że podstawą uzyskania trwałych nawierzchni mostowych jest stosowanie najwyższej jakości materiałów, rygorystyczne przestrzeganie technologii wykonania warstw konstrukcyjnych nawierzchni oraz izolacji i zapewnienie dobrych połączeń międzywarstwowych, tj. między podłożem a warstwą izolacji, między izolacją a warstwą ochronną oraz między warstwą ochronną a warstwą ścieralną. Stąd wynika konieczność stosowania w niektórych rozwiązaniach materiałowo-technologicznych warstw szepnych.

2 ANALIZA SZCZEGÓLNYCH WARUNKÓW PRACY IZOLACJI I KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI MOSTOWYCH

2.1 Ogólna charakterystyka szczególnych warunków pracy nawierzchni mostowej

Nawierzchnia mostowa, jako element obiektu inżynierskiego, pracuje w bardzo specyficznych warunkach obciążenia. Nawierzchnia mostowa poddawana jest obciążeniom od ruchu pojazdów samochodowych i czynników klimatycznych. Na nawierzchnie działają siły poziome i pionowe, niskie i wysokie temperatury, woda oraz sole odladzające. Agresywność obciążeń w przypadku nawierzchni mostowych jest znacznie wyższa niż nawierzchni drogowych. Od obciążeń kół pojazdów samochodowych nawierzchni mostowej, podobnie jak w nawierzchni poza obiektem, powstają naprężenia i odkształcenia ściskające i rozciągające, mogące powodować trwałe deformacje lepkoplastyczne i spękania zmęczeniowe warstw asfaltowych. Ze względu na dużą sztywność pomostów betonowych i stalowych naprężenia i odkształcenia nawierzchni mostowej są większe niż w nawierzchni na korpusie drogowym, a co za tym idzie większe są możliwości powstania zniszczeń mostowych [3].

Naprężenia rozciągające w nawierzchni mostowej powstają zarówno na spodzie warstw asfaltowych jak i w górnej strefie nawierzchni. Naprężenia rozciągające w górnej strefie zależą od jej grubości i sztywności [16]. W niskiej temperaturze eksploatacyjnej, gdy nawierzchnia asfaltowa od góry i od dołu ulega oziębieniu, następuje wzrost sztywności warstw konstrukcyjnych i im są one cieńsze, tym większe zachodzi niebezpieczeństwo zniszczenia całej nawierzchni. Nawierzchnia asfaltowa może szybciej ulegać zniszczeniu wskutek odspojenia nawierzchni od pomostu i wskutek zmęczenia. Ze względu na odporność na spękania zmęczeniowe od naprężeń rozciągających w górnej strefie korzystniejsze jest stosowanie grubszych nawierzchni. Naprężenia rozciągające na spodzie warstw bitumicznych nawierzchni zależą od rodzaju warstw asfaltowych (rodzaj mieszanek mineralno-asfaltowych, grubości warstw, jakości połączenia międzywarstwowego pomiędzy warstwą ścieralną i ochronną nawierzchni, warstwą ochronną a izolacją oraz izolacją i pomostem. Szczególnie niebezpieczna jest utrata połączenia izolacji z pomostem i nawierzchni z izolacją skutkująca gwałtownym zmniejszeniem trwałości nawierzchni [17, 18, 19].

Duże naprężenia ściskające od obciążeń od pojazdów na mostowych nawierzchniach asfaltowych mogą powodować płynięcie materiału lepkosprężystego jakim jest mieszanka mineralno-asfaltowa. Wielkość naprężeń zależy od modułu sztywności nawierzchni, który zależy od temperatury, częstotliwości obciążenia, czasu działania obciążenia i wielkości obciążenia. Jest to szczególnie niebezpieczne w okresie letnich upałów, gdy temperatura nawierzchni osiąga 70 °C (przy temperaturze powietrza wynosi 35 °C) [20, 21]. Może to prowadzić do powstawania odkształceń trwałych w postaci kolein.

Nawierzchnia mostowa w znacznie większym stopniu narażona jest na obciążenia termiczne niż nawierzchnia drogowa wiąże się to z tym, że ze względu na brak korpusu ziemnego o dużej bezwładności termicznej nawierzchnia na obiekcie mostowym podlega szybszym dobowym zmianom temperatury. Zmiany temperatury powietrza oddziałują na nawierzchnię zarówno od góry jak i od dołu przez płytę pomostu. Szybkie zmiany temperatury nawierzchni powodują powstanie zmiennych naprężeń ściskających i rozciągających, które w efekcie mogą powodować spękania zmęczeniowe w warstwach konstrukcyjnych nawierzchni. Jeśli nałoży się na to szkodliwe działanie wody i środków odladzających może nastąpić zniszczenie nawierzchni w postaci ubytków materiału nawierzchni, co może powodować niebezpieczeństwo korozji pomostu obiektu mostowego.

W realizowanym projekcie badawczym głównym celem jest analiza stosowanych rozwiązań technicznych izolacji i nawierzchni na pomostach betonowych i stalowych obiektów mostowych, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu oddziaływania wysokich temperatur technologicznych na trwałość materiałów stosowanych do warstw izolacji i nawierzchni.

Przy realizacji projektu przeanalizowano aktualnie stosowane rozwiązania materiałowo-technologiczne asfaltowych systemów nawierzchniowych na mostach, uwzględniając skład materiałowy, warunki wykonywania tych warstw, możliwość wystąpienia zniszczeń. Stosowane w ostatnim okresie technologie wykorzystujące nowe rozwiązania izolacyjne i nawierzchniowe coraz częściej zalecają stosowanie dodatków modyfikujących asfalty drogowe, tj. głównie polimerów, których stosowanie wymaga skrupulatnego przestrzegania wymagań przewidzianych dla danej technologii. Warunki wykonania asfaltowych systemów nawierzchniowych dotyczą przede wszystkim dopuszczalnych temperatur technologicznych, których przekroczenie, w przypadku stosowania polimerów, może spowodować zarówno degradację warstwy izolacji oraz asfaltowych warstw nawierzchni.

Na podstawie przeglądu aktualnej literatury dotyczącej rozwiązań materiałowo-technologicznych wykonywania izolacji i nawierzchni mostowych można sformułować ogólne zalecenia istotne dla trwałości obiektów mostowych.

- **Izolacje mostowe**

Izolacja obiektu mostowego powinna być trwała a czas jej użytkowania nie powinien być krótszy od trwałości warstw nawierzchni.

Izolacja powinna [10]:

- zabezpieczać płytę pomostu przede wszystkim przed szkodliwym działaniem wody,
- zapewniać dobre połączenie z płytą pomostu i z nawierzchnią,
- być odporna na stosowanie środków odladzających.

Należy zwrócić uwagę, że dużą grupę materiałów hydroizolacyjnych stosowanych na obiektach mostowych stanowią materiały asfaltowe, w skład których wchodzi polimer. Wśród wymienionych rozwiązań materiałowo-technologicznych stosowanych do izolacji przeciwwodnych obiektów mostowych, poza asfaltowymi izolacjami arkusзовymi oraz izolacjami z tworzyw sztucznych, możliwe jest stosowanie izolacji z zastosowaniem mastyksu lub asfaltu lanego. Tego rodzaju izolacje są z powodzeniem stosowane w wielu krajach europejskich ze względu na łatwość ich wykonania w sposób zmechanizowany. W Polsce izolacje z mastyksu są stosowane w ograniczonym zakresie ale na kilku dużych obiektach mostowych spełniają one w bardzo dobry sposób wszystkie wymagania stawiane izolacjom i wykazują się dużą trwałością.

Izolacje z mastyksu wykonuje się na poziomych powierzchniach pomostów mostów drogowych, na mostach stalowych oraz na mostach betonowych. Mastyks tradycyjny składa się z 30-40% m/m wypełniacza, 60-40% m/m piasku łamanego, oraz 14-16% m/m asfaltu.

- **Warstwy ochronne i ścieralne z asfaltu lanego**

Najczęściej w asfaltowych nawierzchniach na obiektach mostowych stosuje się do warstwy ochronnej i ścieralnej mieszankę mineralno-asfaltową typu asfalt lany (MA). Innym rozwiązaniem konstrukcji nawierzchni mostowej jest wykonanie warstwy ochronnej z asfaltu lanego (MA) a warstwy ścieralnej z mastyksu grysowego SMA. Możliwe jest również wykonanie warstwy ochronnej z asfaltu lanego (MA) a warstwy ścieralnej z betonu asfaltowego (AC).

Asfalt lany jest technologią po raz pierwszy zastosowaną w Niemczech, która ze względu na swoje zalety, upowszechniła się w całej Europie. Asfalt lany jest technologią wykonywaną na gorąco a warstwa ścieralna z asfaltu lanego wymaga specjalnego uszorstnienia przez wtłoczenie kruszywa asfaltowanego lub posypanie ostrym piaskiem łamanym (2-3 kg/m²) i zatarciem. Do zalet asfaltu

lanego można zaliczyć odporność na działanie czynników środowiska, działanie wody i środków chemicznych stosowanych do odładzania.

Asfalt lany jest mieszanką mineralno-asfaltową składającą się z mączki mineralnej, piasku naturalnego i łamanego (50/50), grysów oraz asfaltu, układaną, profilowaną i zagęszczaną na gorąco. W porównaniu do betonu asfaltowego (AC) zawiera on około 2,5 raza więcej wypełniacza oraz około 2% więcej asfaltu. Charakteryzuje się dużą zawartością grysów 55-57%, piasku naturalnego i łamanego oraz wypełniacza wapiennego 20-28%. Duża ilość asfaltu i wypełniacza powodują, że asfalt lany w temperaturze układania jest płynny i nie wymaga zagęszczania. Charakterystyczne dla asfaltu lanego brak zawartości wolnej przestrzeni. Podstawową zaletą asfaltu lanego jest trwałość, największa ze wszystkich mieszanek mineralno-asfaltowych, zaś pewną wadą niedostateczna szorstkość.

Nowym rozwiązaniem materiałowo-technologicznym jest zastosowanie do asfaltu lanego dodatku rozdrobnionej gumy ze zużytych opon samochodowych. Opracowana technologia zaleca stosowanie do asfaltu lanego gumy dozowanej bezpośrednio do lepiszcza (metoda modyfikacji na mokro) oraz do kruszywa (metoda modyfikacji na sucho). Zaletą tego rozwiązania jest uzyskanie warstwy asfaltu lanego o podwyższonej izolacyjności termicznej i poprawionej odporności na spękania niskotemperaturowe [22].

Interesującą technologią, którą można zaliczyć do asfaltu lanego, jest twórcze połączenie technologii asfaltu lanego MA oraz mastyksu grysowego SMA. Technologia ta zaleca stosowanie dużej ilości grysów w celu zwiększenia odporności mechanicznej mieszanki na odkształcenia. Charakteryzuje się ona niską zawartością wolnych przestrzeni ($< 1\% \text{ m/m}$) i może być ona stosowana do warstw izolacji i warstw ochronnych [11].

2.2 Analiza stanu naprężeń i odkształceń konstrukcji nawierzchni mostowej.

2.2.1 Wprowadzenie

Nawierzchnie drogowe odgrywają szczególną rolę, polegającą na zapewnieniu bezpieczeństwa oraz komfortu jazdy jej użytkownikom. Procedury projektowania nawierzchni drogowych na naziemiu są dobrze przebadane oraz sprawdzone w praktyce, natomiast brakuje odpowiednich procedur projektowania nawierzchni na obiektach mostowych. Coraz częściej zauważa się, że żywotność nawierzchni drogowej na obiekcie mostowym jest znacznie niższa niż nawierzchni na naziemiu [3]. Przyczynami mniejszej żywotności prawdopodobnie są inne wartości oraz rozkłady odkształceń w nawierzchni spowodowane drganiami obiektu mostowego.

Badanie eksperymentalne nawierzchni drogowej na obiekcie mostowym jest o wiele trudniejsze niż w przypadku tradycyjnej nawierzchni, gdyż jedyną miarodajną metodą są badania na rzeczywistym obiekcie mostowym [23]. Wiąże się to z zamknięciem obiektu oraz przebadaniem wielu mostów. Wnioski wyciągnięte na podstawie jednego badania nie mogą być ekstrapolowane na inne obiekty, gdyż każdy most z racji różnej konstrukcji, sztywności oraz rozpiętości przęsła będzie zachowywał się inaczej [24].

Głównym celem prezentowanego opracowania jest zamodelowanie z dużą dbałością o szczegóły, warstw asfaltowych na przykładowym obiekcie mostowym pod wpływem obciążenia pochodzącego od pojazdu ciężarowego, oraz analiza współpracy nawierzchni z konstrukcją mostu. Możliwość określenia naprężeń oraz odkształceń nawierzchni na obiekcie mostowym otwiera drogę do dalszych badań nad możliwością poprawy jej trwałości.

2.2.2 Zakres pracy

Prezentowano studium modelowania numerycznego nawierzchni mostowej poddanej oddziaływaniu obciążenia ruchomego. Do modelowania numerycznego wybrano model rzeczywistego mostu strunobetonowego o rozpiętości przęsła 21.7 m. W celu obciążenia mostu użyto model typowego pojazdu członowego składającego się z ciągnika siodłowego, oraz naczepy o masie całkowitej 40 ton [25].

Zagadnienie jest analizowane za pomocą nieliniowej metody elementów skończonych, a obliczenia wykonano z zastosowaniem komercyjnego kodu MES LS-DYNA® [26]. Pomimo coraz szybszych procesorów oraz coraz większych klastrów obliczeniowych, nadal problemem jest szczegółowe zamodelowanie przejazdu pojazdu po moście w celu oszacowania zachowania nawierzchni drogowej. W trakcie symulacji komputerowej należy przewidzieć pewien przedział czasu, potrzebny do ustabilizowania ruchu pojazdu, także po zjeździe z należy uwzględnić odpowiedni okres pozwalający na wychwycenie drgań swobodnych mostu. Realizacja głównego celu analizy, tj. wyznaczenie lokalnych wielkości mechanicznych takich jak naprężenia i odkształcenia, wymaga odpowiednio gęstej siatki podziału. Tylko w takim przypadku można wiarygodnie oszacować wartości naprężeń i odkształceń w warstwach nawierzchni drogowej.

Aby uniknąć problemu ze zbyt dużym czasem obliczeń w poniższym opracowaniu zastosowano metodę submodelingu [26]. Stosując tę metodę analizę numeryczną przeprowadza się w dwóch krokach. W pierwszym kroku analizuje się tylko globalne zachowanie mostu pod przejeżdżającym pojazdem korzystając z modelu o relatywnie rzadkiej siatce. W drugim kroku natomiast uwzględnia się tylko wycinek mostu o zagęszczonej lokalnie siatce podziału na elementy skończone. Jest to ta część konstrukcji w której wyznacza się odkształcenia i naprężenia. W drugim kroku obliczeniowym uwzględnia się warunki kinematyczne na brzegu wycinka, wyznaczone we wcześniejszym kroku obliczeniowym.

Po zbudowaniu wiarygodnego modelu pojazdu członowego oraz mostu, przebadano różne rodzaje szczepności warstw nawierzchni asfaltowych z konstrukcją obiektu mostowego.

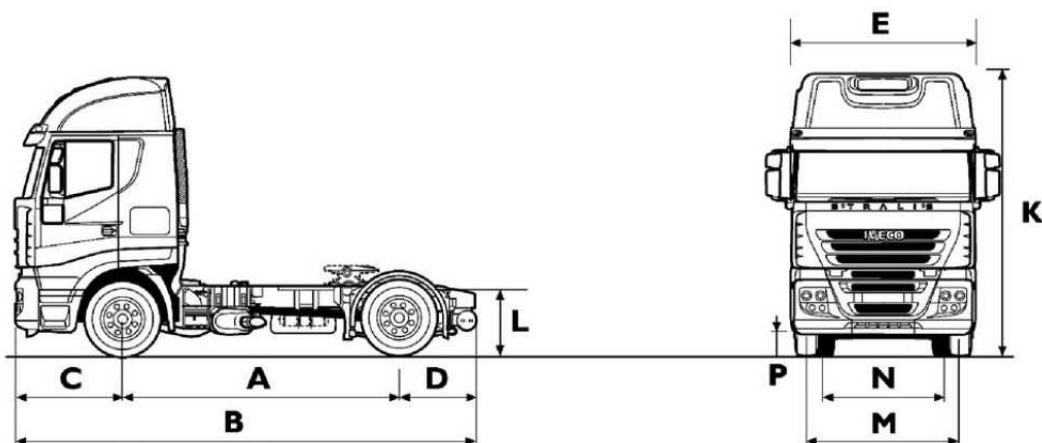
2.2.3 Opracowanie modeli numerycznych

Specyfikacja rzeczywistego pojazdu ciężarowego

W celu opracowania wiarygodnego modelu numerycznego, posłużono się specyfikacją rzeczywistego pojazdu ciężarowego (o ładowności 40 ton) spotykanego w Europie (rys. 2-1). Do analizy wykorzystano ciągnik siodłowy typu STRALIS (AS 440S45 T/P) marki IVECO (rys. 2-2), oraz naczepę typu NS3S firmy WIELTON (rys. 2-3) o rozstawie osi równej 1310 mm i długości całkowitej 13,92 m [27]. Cały pojazd składa się z ciągnika siodłowego o masie 4.3 tony oraz naczepy z ładunkiem o masie 36.4 tony.



Rys. 2-1. Przykładowy pojazd członowy spotykany w Europie [28]



WYMIARY (mm)

A	Rozstaw osi	3650	3800
B	Długość	6076	6256
C	Zwis przedni	1410	
D	Zwis tylny	1048	
E	Szerokość *	2550	
M	Rozstaw kół przednich	2049	
N	Rozstaw kół tylnych	1818	
L	Wysokość podw. bez obciążenia	982	
K	Wysokość kabiny bez obciążenia **	3783	

Rys. 2-2. Specyfikacja pojazdu firmy IVECO typ STRALIS (AS 440S45 T/P) [28]

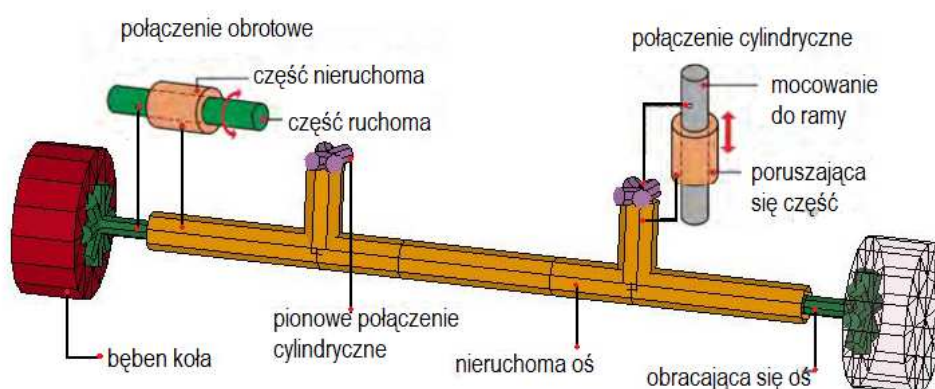


Rys. 2-3. Naczepa typu NS35 firmy WIELTON [27]

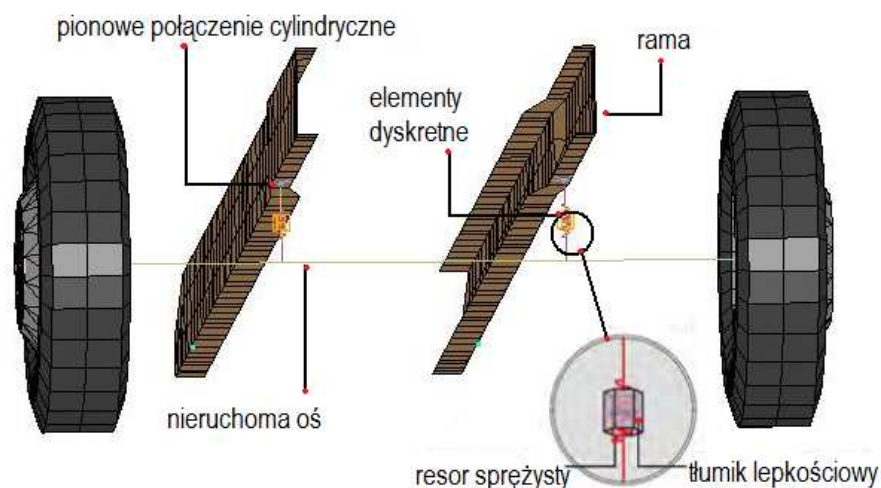
Model MES pojazdu

W pracy wykorzystano model numeryczny wcześniej opracowanego pojazdu ciężarowego [29], który został zmodyfikowany i dostosowany do specyfikacji typowych pojazdów członowych (opisanych w podrozdziale „Specyfikacja rzeczywistego pojazdu ciężarowego”). Model MES składa się łącznie z 19 923 elementów skończonych.

Układ zawieszenia pojazdu wraz z najważniejszymi jego elementami przedstawiono na rys. 2-4. Każde zawieszenie składa się z obracających się osi poziomych połączonych z ramą pojazdu za pomocą pionowych połączeń cylindrycznych. Każdą oś zamodelowano jako ciało sztywne za pomocą elementów belkowych a ich obrót jest możliwy dzięki zastosowaniu opcji ‘revolve joint’ [26]. Opcja ta została wykorzystana również do połączenia naczepy z ciągnikiem siodłowym. Ruch osi w płaszczyźnie pionowej uzyskano za pomocą połączeń cylindrycznych oraz specjalnych elementów dyskretnych o masie zerowej, które symulują pożądaną sztywność i parametry tłumienia (rys. 2-5).

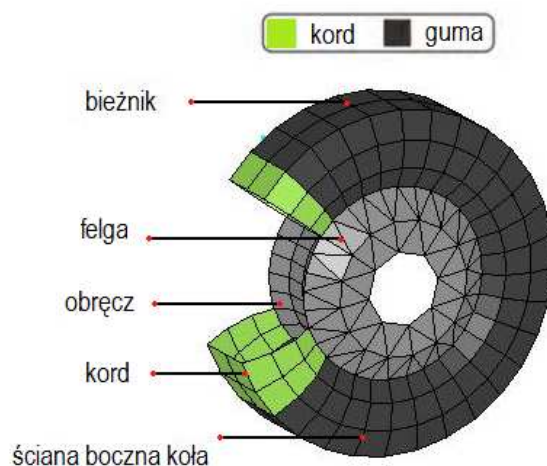


Rys. 2-4. Schemat połączeń zastosowanych w modelu MES zawieszenia [30]



Rys. 2-5. Zastosowanie elementów dyskretnych w modelu zawieszenia [30]

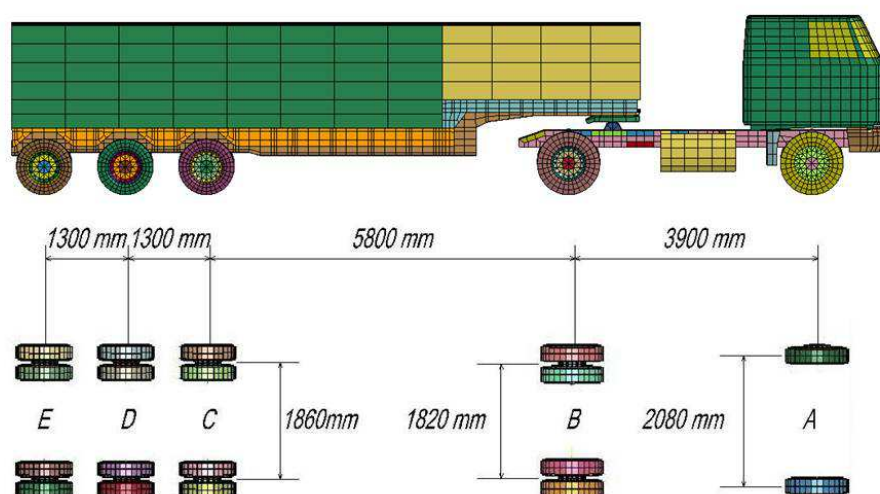
Prawidłowe odwzorowanie kół pojazdu jest kluczowym elementem w analizie numerycznej. Istniejące obecnie metody modelowania umożliwiają stworzenie pneumatycznych, trój-wymiarowych i obracających się kół oddziaływujących z nawierzchnią za pomocą dobrze dobranego algorytmu kontaktu. W modelu wykorzystano 3-węzłowe elementy do konstrukcji felg oraz 4-węzłowe elementy do obręczy i opon (rys. 2-6). Ciśnienie w oponach zostało zamodelowane za pomocą opcji 'airbag' [26]. Wartość ciśnienia w każdej z nich została podana w dalszej części raportu.



Rys. 2-6. Model MES koła wraz z opisem elementów [30]

Opona składa się z dwóch części: ścian bocznych i bieżnika. Każda z nich zbudowana jest z dwóch warstw 4-węzłowych elementów powłokowych, wzajemnie się pokrywających. Pierwsza warstwa odwzorowuje gumę z typowymi dla tego materiału parametrami. Natomiast druga warstwa odzwierciedla kord z wykorzystaniem modelu materiałowego dla tkanin z sztywnością tylko na rozciąganie.

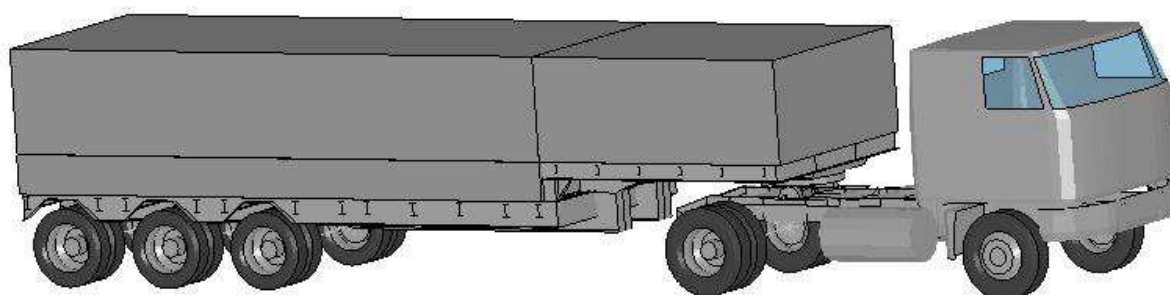
Pozostała część pojazdu ze względu na nikły wpływ na wyniki oraz wymagany czas analizy numerycznej została zamodelowana w sposób uproszczony za pomocą ciał sztywnych. Szczegóły dotyczące rozstawu osi oraz widok pojazdu z boku przedstawiono na rys. 2-7. Ładunek oraz ciężar pojazdu dobrano w taki sposób aby nacisk na każdą z osi był zgodny z otrzymanymi danymi (rys. 2-8). Nacisk na każdą z osi pojazdu, błąd względny pomiędzy specyfikacją pojazdu a modelem numerycznym oraz ciśnienie dla każdej osi przedstawiono w tabl. 2-1.



Rys. 2-7. Widok z boku oraz rozstaw kół pojazdu członowego wraz z oznaczeniami osi

Tablica 2-1. Zestawienie i porównanie sił działających na osie pojazdu oraz ciśnienie w oponach

Oś	Nacisk w modelu MES [kN]	Nacisk wg specyfikacji [kN]	Błąd względny [%]	Ciśnienie w oponach [bar]
A	45,56	45	-1,24	7.6
B	118,95	115	-3,43	6.9
C	85,30	80	-6,63	8.3
D	82,56	80	-3,2	8.3
E	79,05	80	1,19	8.3



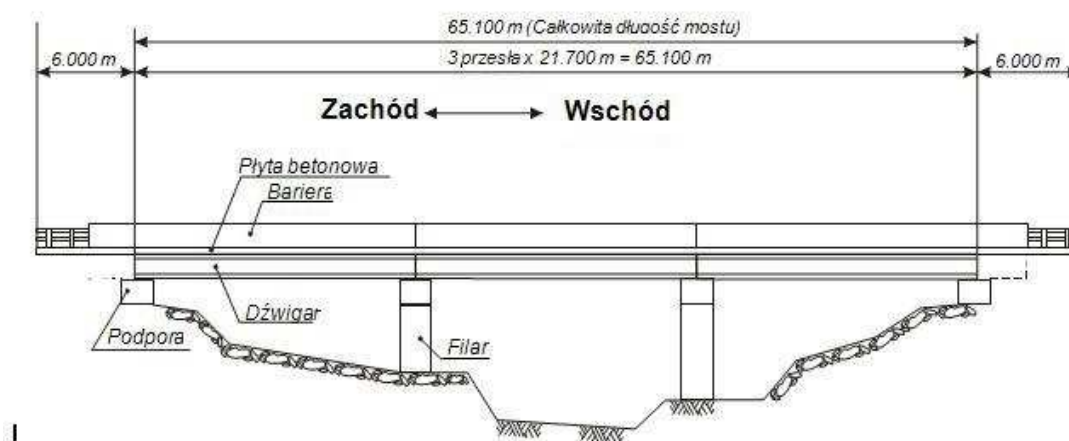
Rys. 2-8. Model MES pojazdu ciężarowego z odpowiednio dobranym ładunkiem

Specyfikacja wybranego mostu

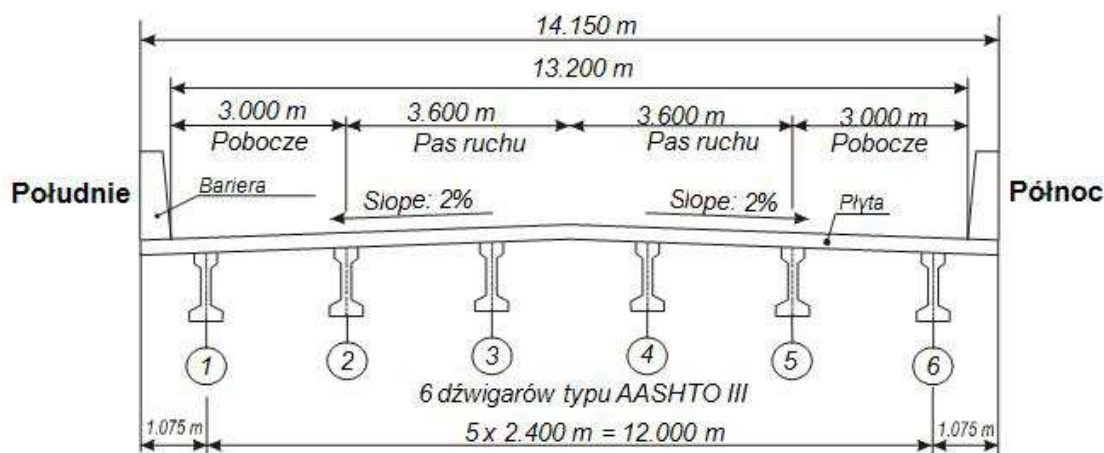
W pracy wykorzystano specyfikację tróiprzęsłowego mostu wybudowanego w 1999 roku nad rzeką Mosquito w zachodniej Florydzie (rys. 2-9) [31]. Każde przęsło mostu ma długość 21.7 m i jest podtrzymywane przez 6 dźwigarów strunobetonowych typu AASHTO III rozstawionych co 2.4 m [31]. Na moście znajdują się dwa pasy ruchu o szerokości 3.60 każdy, z obustronnym poboczem o szerokości 3 m. Całkowita szerokość prześła wynosi 14.5 m. Przekrój podłużny i poprzeczny mostu przedstawiono odpowiednio na rys. 2-10 i rys. 2-11.



Rys. 2-9. Widok mostu nad strumykiem Mosquito (USA) [31]



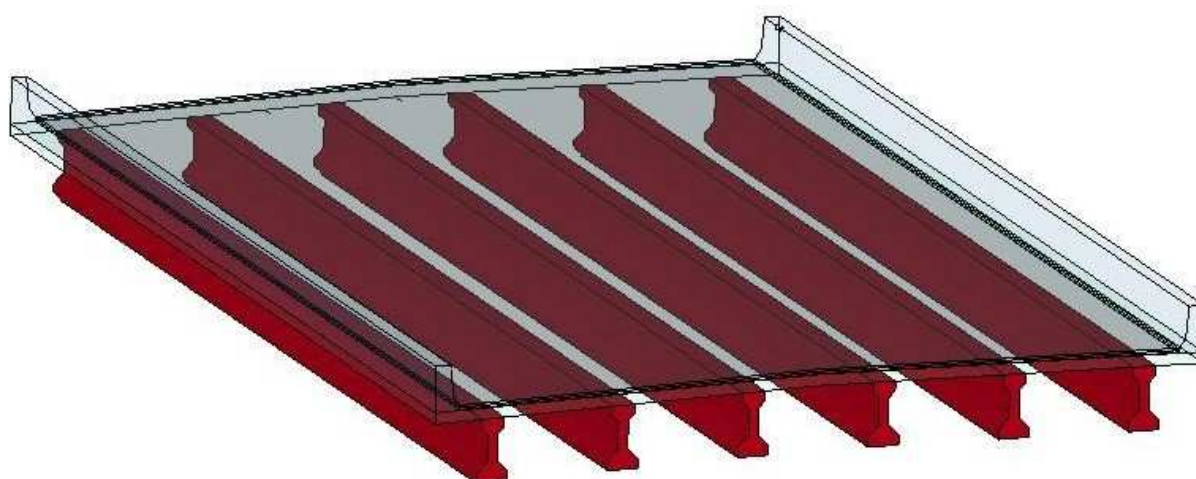
Rys. 2-10. Przekrój podłużny mostu nad strumykiem Mosquito (USA) [25]



Rys. 2-11. Przekrój poprzeczny mostu nad strumykiem Mosquito (USA) [25]

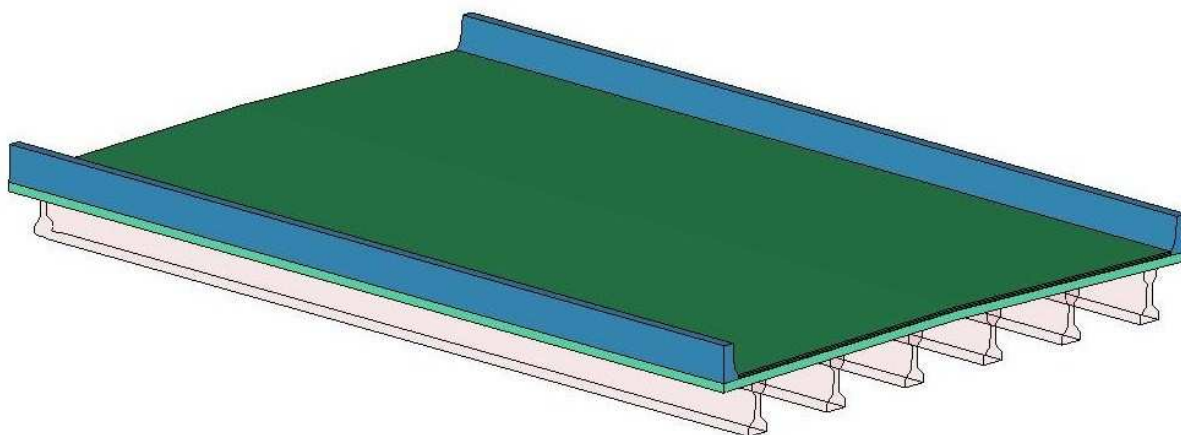
Model MES mostu

W pracy posłużono się modelem mostu opracowanym przez Crashworthiness and Impact Analysis Laboratory CIAL [31]. Dźwigary podtrzymujące most (rys. 2-12) zostały zamodelowane elementami bryłowymi za pomocą materiału sprężystego o parametrach: $\rho = 2.3 \text{ t/m}^3$, $E = 37.5 \text{ GPa}$, $\nu = 0.2$. Zbrojenie miękkie znajdujące się w każdym dźwigarze (6 prętów o średnicy 16 mm) zostało zamodelowane elementami belkowymi o parametrach typowych dla stali zbrojeniowej: $\rho = 7.85 \text{ t/m}^3$, $E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$. Zbrojenie sprężające (łącznie 12 kabli w każdym podciągu) zamodelowano elementami dyskretnymi pozwalającymi na zadanie wstępnej siły naciągu korzystając z materiału sprężystego o parametrach jak dla zwykłej stali zbrojeniowej.



Rys. 2-12. Model MES mostu z widocznymi dźwigarami typu AASHTO III

Na dźwigarach opiera się płyta betonowa (rys. 2-13) o grubości 20 cm i wymiarach 21.7 m na 14.15 m. Jest nachylona od środka jezdni w kierunkach barier (spadek 2%, wg rys. 2-11). Model płyty zamodelowano elementami bryłowymi z materiału sprężystego o parametrach: $\rho = 2.3 \text{ t/m}^3$, $E = 40 \text{ GPa}$, $\nu = 0.2$. Bariery betonowe (rys. 2-13) o wymiarach 46 cm x 82,5 cm zostały zamodelowane z materiału sprężystego o parametrach $\rho = 2.3 \text{ t/m}^3$, $E = 37.5 \text{ GPa}$, $\nu = 0.2$.



Rys. 2-13. Model MES płyty betonowej wraz z barierami ochronnymi

Pierwszą warstwą nawierzchni drogowej jest warstwa mieszanki mineralno asfaltowej SMA o grubości 4 centymetrów zamodelowana za pomocą uogólnionego modelu Maxwella używając 5 członów szeregu Prony'ego. Parametry materiałowe warstwy ścieralnej SMA przedstawiono w tabl. 2-2. Poniżej znajduje się 4 centymetrowa warstwa asfaltu lanego (MA), zamodelowanego również za pomocą uogólnionego modelu Maxwella o właściwościach przedstawionych w tabl. 2-3.

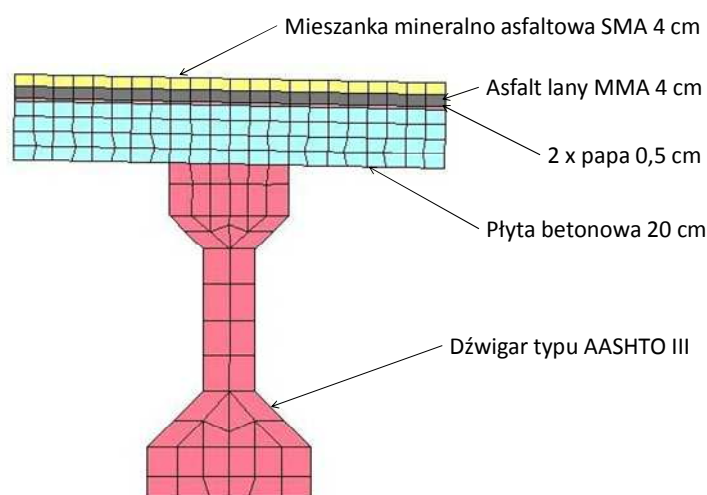
Tablica 2-2. Parametry szeregu Prony'ego do modelu materiałowego warstwy ścieralnej SMA

Część dewiatorowa		Część kulista	
G_i [MPa]	β_i [s]	G_i [MPa]	β_i [s]
426	1.31905	923	1.31905
835	0.05711	556	0.05711
641	45.75000	427	45.75000
1576	450.14286	1050	450.14286
567	8.04255	378	8.04255

Tablica 2-3. Parametry szeregu Prony'ego do modelu materiałowego warstwy asfaltu lanego MA

Część dewiatorowa		Część kulista	
G_i [MPa]	β_i [s]	G_i [MPa]	β_i [s]
222	3.50303	482	3.50303
300	0.55762	200	0.55762
654	19.23529	436	19.23529
1043	208.50000	695	208.50000
334	0.00093	222	0.00093

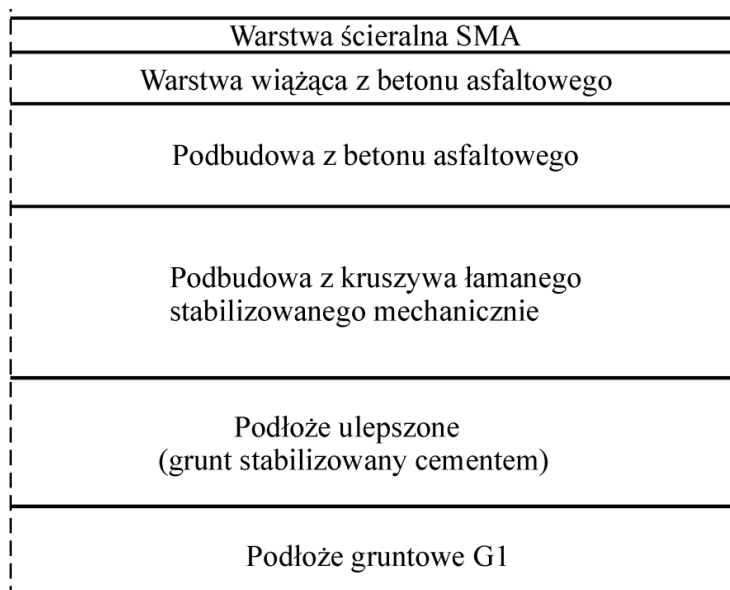
Pomiędzy warstwami asfaltowymi, a płytą betonową znajduje się podwójna warstwa papy o łącznej grubości 1 cm. W analizowanym modelu nie uwzględniano tej warstwy jako warstwy konstrukcyjnej, zaś jedynie jako warstwę zapewniającą współpracę nawierzchni z konstrukcją mostu. Do zamodelowania tej warstwy użyto materiału COHESIVE_EASTIC, który pomimo zamodelowania papy elementami bryłowymi nadając im grubość, opisuje tylko zachowanie w płaszczyźnie współpracy nawierzchni drogowych z konstrukcją mostu. Nie znając szczegółowych danych rozpatrzono różne wartości szepności nawierzchni asfaltowej z konstrukcją mostu w zakresie od 0% do 100%, gdzie 0% oznacza brak czepności (poślizg), zaś 100% oznacza pełną współpracę nawierzchni z konstrukcją mostu. W przypadku 100% współpracy warstwa papy przy najwyższych analizowanych prędkościach odkształceń zachowuje się w płaszczyźnie ścinania jak warstwa asfaltu lanego MA, która znajduje się powyżej. Na rys. 2-14 przedstawiono fragment przekroju mostu z opisanym wcześniej układem warstw.



Rys. 2-14. Przekrój przez fragment nawierzchni mostowej wraz z płytą betonową i dźwigarem

Model MES nawierzchni na naziomie

Do analizy numerycznej nawierzchni na naziomie zbudowano model typowej nawierzchni drogowej z warstwami jak na rys. 2-15. Wszystkie elementy zostały zamodelowane za pomocą elementów bryłowych z materiału sprężystego o parametrach przedstawionych na rys. 2-16. Wymiary fragmentu nawierzchni użytej w analizie wynoszą 6 m x 6 m x 1,1 m.



Rys. 2-15. Przekrój przez warstwy modelu nawierzchni na naziemie [32]

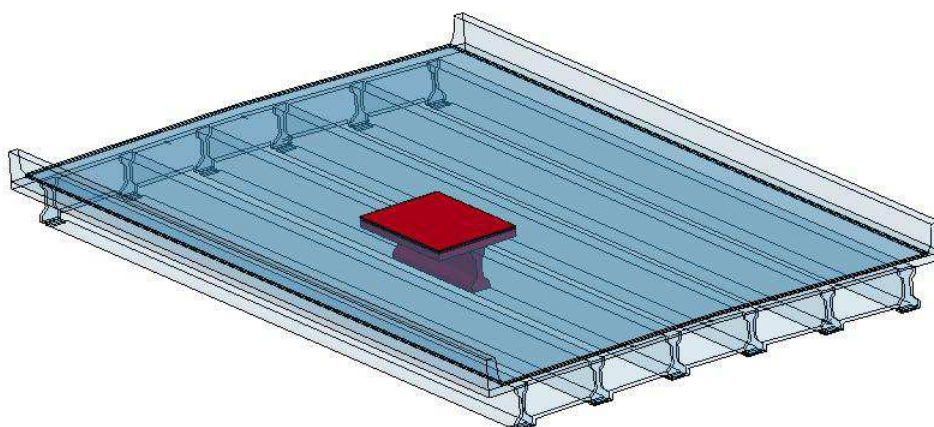
$E_1 = 9800 \text{ MPa}$	$\nu_1 = 0,3$	$h_1 = 4 \text{ cm}$
$E_2 = 11500 \text{ MPa}$	$\nu_2 = 0,3$	$h_2 = 6 \text{ cm}$
$E_3 = 10900 \text{ MPa}$	$\nu_3 = 0,3$	$h_3 = 12 \text{ cm}$
$E_4 = 400 \text{ MPa}$	$\nu_4 = 0,3$	$h_4 = 20 \text{ cm}$
$E_5 = 300 \text{ MPa}$	$\nu_5 = 0,3$	$h_5 = 15 \text{ cm}$
$E_6 = 100 \text{ MPa}$	$\nu_6 = 0,35$	$h_6 = 55 \text{ cm}$

Rys. 2-16. Parametry warstw nawierzchni na naziemie [32]

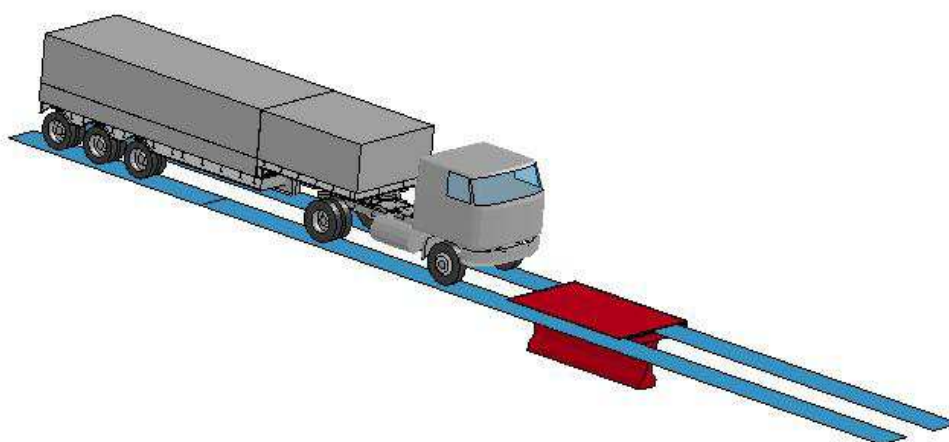
Submodelling

Nawierzchnia na obiekcie mostowym

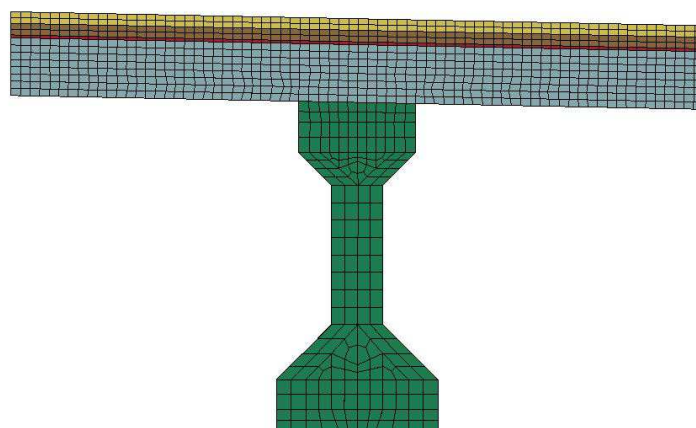
Przy analizie numerycznej dużych konstrukcji, oraz długim czasie analizy, częstym problemem jest uzyskanie odpowiedniej gęstości siatki w celu lokalnego oszacowania naprężeń oraz odkształceń. Te wartości są silnie zależne od gęstości siatki, więc w przypadku analizowanego mostu powinno być przynajmniej kilka elementów na grubości analizowanych warstw nawierzchni. Modelując natomiast cały most używając tak gęstej siatki, otrzymujemy model, który jest zbyt duży, aby można wykonać analizę numeryczną przejazdu pojazdu. Aby rozwiązać ten problem zastosowano metodę submodelingu [26]. Oznacza to, że zamiast jednej symulacji całości, wykonuje się dwie oddzielne symulacje. W pierwszej analizie pojazd przejeżdża po modelu mostu o relatywnie rzadkiej siatce w celu oszacowania globalnego zachowania mostu. W drugiej analizie natomiast bada się tylko wycinek mostu (rys. 2-17) o zagęszczonej siatce (rys. 2-19), zaś na płaszczyznach, które wycinają fragment mostu zadaje się przemieszczenia uzyskane z pierwszej analizy z wykorzystaniem modelu o rzadkiej siatce. Aby pojazd mógł jechać jak po całym moście, stworzony również 2 pasma z elementów powłokowych, do których również zadano zmienne w czasie przemieszczenia zapisane z pierwszej analizy (rys. 2-18).



Rys. 2-17. Fragment mostu wybrany do submodelingu



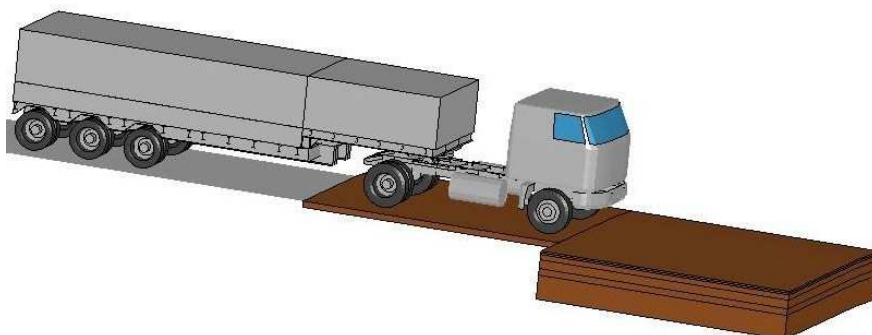
Rys. 2-18. Fragment wybrany do submodelingu wraz z pojazdem



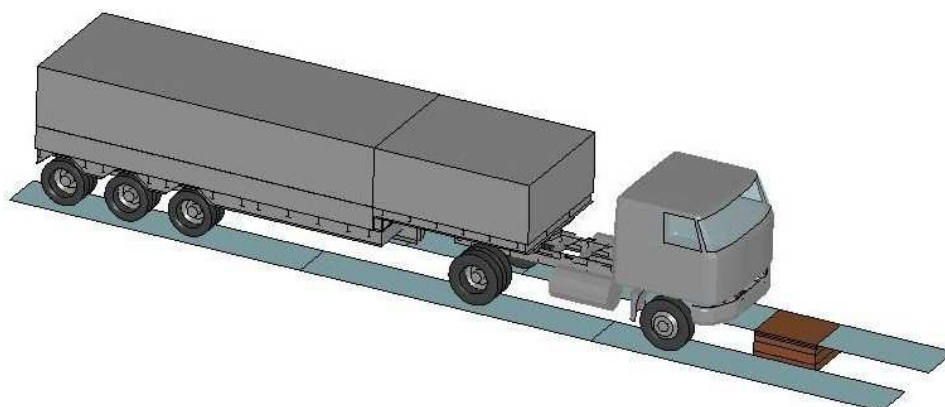
Rys. 2-19. Przekrój przez fragment modelu mostu z zagęszczoną siatką podziału

Nawierzchnia na naziemie

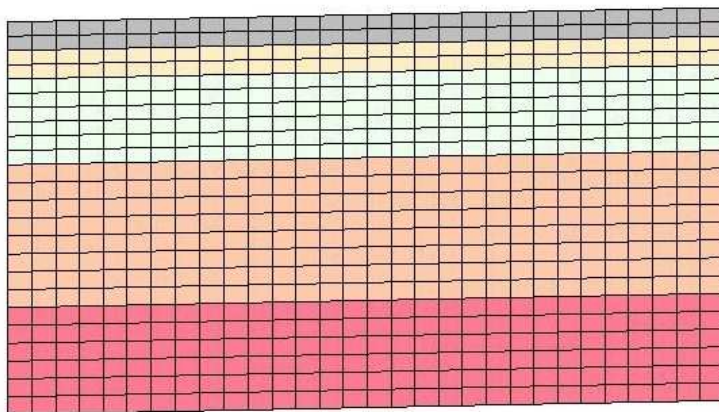
W analizie numerycznej nawierzchni drogowej na naziemie również wykorzystano metodę submodellingu. W pierwszej części obliczeń przeprowadzono analizę z wykorzystaniem całego modelu (rys. 2-20). Następnie przeanalizowano jedynie wycinek nawierzchni o zagęszczonej siatce podziału (rys. 2-22) na elementy skończone zadając na jej krańcach wcześniej uzyskane przemieszczenia. Aby umożliwić ruch pojazdu, stworzono dwa pasma z elementów powłokowych, analogicznie jak w przypadku z analizą fragmentu mostu (rys. 2-21).



Rys. 2-20. Model pojazdu wraz z nawierzchnią na naziemie



Rys.2-21. Fragment wybrany do submodelingu wraz z pojazdem



Rys. 2-22. Przekrój przez fragment modelu nawierzchni z zagęszczoną siatką podziału

2.2.4 Opracowanie modeli mieszanek mineralno-asfaltowych

Wprowadzenie

Mieszanki mineralno-asfaltowe (MMA) stanowią podstawowy budulec warstw konstrukcyjnych nawierzchni drogowych. Istotnym zagadnieniem w procedurze projektowania konstrukcji nawierzchni jest wybór odpowiedniego modelu konstytutywnego MMA, odzwierciedlającego cechy mieszanki w szerokim zakresie obciążeń mechanicznych i środowiskowych. W następnych rozdziałach przedstawiono procedurę identyfikacji modelu konstytutywnego MMA przy założeniu liniowego, lepkosprężystego materiału. Wykorzystano testy cyklicznego rozciągania próbek MMA dla dwóch rodzajów mieszanki. Procedura identyfikacji bazuje na analizie modułów zespolonych struktur reologicznych. Rozpatrzono uogólniony model Maxwella o różnej liczbie elementów. Parametry założonej struktury skalibrowano rozwiązując odpowiednio sformułowane zadanie optymalizacji. Przeprowadzono testy materiałowe weryfikujące przydatność wybranego modelu w obliczeniach za pomocą systemu metody elementów skończonych Ls-Dyna.

Metoda

Rozpatrywane zagadnienie polega na ustalaniu związków konstytutywnych, czyli zależności między naprężeniem mechanicznym i wywołanym przez to naprężenie odkształceniem jako funkcji czasu. Uzyskane w eksperymentalny sposób zależności są następnie uogólniane w formie klasyfikacji reologicznej materiału i związanym z nią modelem matematycznym.

Opisywanie mieszanki – wyniki doświadczalne

Poniżej zamieszczono wyniki badań doświadczalnych dwóch typów mieszanek mineralno-asfaltowych. Pierwsza z nich, oznaczona jako TYP-1, to mieszanka mastyksu grysowego SMA, stosowana do budowy warstwy ścieranej nawierzchni drogowej. Druga z nich, oznaczona jako TYP-2, to mieszanka o małej zawartości wolnych przestrzeni typu asfalt lany (MA).

Tabl. 2-4 i 2-5 przedstawiają wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego w zależności od częstotliwości obciążenia. Uzyskane wyniki dotyczą badania w temperaturze 210°C.

Zespolony moduł sztywności został wyliczony na podstawie wzoru:

$$\bar{E}(i\omega) := E_{dyn}(\omega) \exp(i\varphi) \quad (1)$$

Zespolony moduł sztywności jest liczbą zespoloną, którą można opisać również równaniem:

$$\bar{E}(i\omega) := E_{dyn}(\omega) \cos \varphi + i E_{dyn}(\omega) \sin \varphi = E'(\omega) + i E''(\omega) \quad (2)$$

gdzie:

$$E'(\omega) = E_{dyn}(\omega) \cos \varphi \text{ - moduł zachowawczy,}$$

$$E''(\omega) = E_{dyn}(\omega) \sin \varphi \text{ - moduł stratności.}$$

Kąt przesunięcia fazowego stanowi informację o przewadze właściwości lepkich lub sprężystych w materiale: niższa jego wartość tym materiał bardziej sprężysty. Wartość kąta przesunięcia fazowego wynosi 0° dla materiałów idealnie sprężystych oraz 90° dla materiałów doskonale lepkich. Kąt przesunięcia fazowego wynika z faktu, iż w ciałach lepkosprężystych odkształcenie pojawia się z pewnym opóźnieniem w stosunku do obciążenia. Jako kryterium oceny lepkosprężystych właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych przyjmuje się wartość tangensa kąta przesunięcia fazowego.

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{E''}{E'} \quad (3)$$

W tabl. 2-6 i 2-7 przedstawiono część rzeczywistą i urojoną modułu zespolonego obu mieszanek.

Tablica 2-4. Wyniki badań cyklicznego rozciągania próbki mieszanki mineralno-asfaltowej (TYP-1) przy różnych częstotliwościach

N	Częstotliwość f [Hz]	Moduł dynamiczny E_{dyn} [MPa]	Kąt przesunięcia fazowego φ [°]
1	0,1	1991	20,3
2	0,5	2914	18,5
3	1	3322	17,4
4	5,0	4376	14,5
5	10,0	4974	13,7
6	25,0	5575	14,2

Tablica 2-5. Wyniki badań cyklicznego rozciągania próbki mieszanki mineralno-asfaltowej (TYP-2) przy różnych częstotliwościach

N	Częstotliwość f [Hz]	Moduł dynamiczny E_{dyn} [MPa]	Kąt przesunięcia fazowego φ [°]
1	0,1	1114	23,8
2	0,5	1646	22,6
3	1	1962	21,3
4	5,0	2965	17,8
5	10,0	3385	16,9
6	25,0	4020	16,9

Tablica 2-6. Część rzeczywista (moduł zachowawczy) oraz część urojona (moduł stratności) modułu zespolonego mieszanki mineralno-asfaltowej (TYP-1) przy różnych częstotliwościach

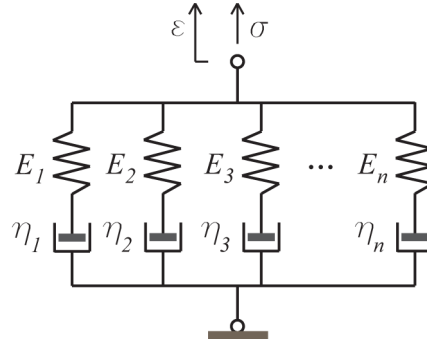
N	Częstotliwość f [Hz]	Moduł zachowawczy E' [MPa]	Moduł stratności E'' [MPa]
1	0,1	1867	691
2	0,5	2763	925
3	1	3170	993
4	5,0	4237	1096
5	10,0	4832	1178
6	25,0	5405	1368

Tablica 2-7. Część rzeczywista (moduł zachowawczy) oraz część urojona (moduł stratności) modułu zespolonego mieszanki mineralno-asfaltowej (TYP-2) przy różnych częstotliwościach

N	Częstotliwość f [Hz]	Moduł zachowawczy E' [MPa]	Moduł stratności E'' [MPa]
1	0,1	1019	450
2	0,5	1520	633
3	1	1828	713
4	5,0	2823	906
5	10,0	3239	984
6	25,0	3846	1169

Opis materiału zaimplementowanego w programie Ls-Dyna

Do analizy reologicznych właściwości badanych mieszanek mineralno-asfaltowych zastosowano liniowo-lepkosprężysty uogólniony model Maxwella. Model powstaje przez równoległe połączenie n gałęzi Maxwella. Konfiguracja elementów podstawowych tej struktury reologicznej została pokazana na rys. 2-23.



Rys. 2-23. Struktura reologiczna uogólnionego modelu Maxwella

Równanie charakteryzujące związek pomiędzy naprężeniem a odkształceniem w uogólnionym modelu Maxwella w przypadku jednowymiarowym jest następujące:

$$\sigma = \int_0^t g(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (4)$$

gdzie $g(t-\tau)$ jest funkcją relaksacji.

Część kulista i dewiatorową tensorów odkształcenia i naprężenia są rozpatrywane osobno. W rozpatrywanym zadaniu przyjęto jednakowe widmo czasów relaksacji w części kulistej i dewiatorowej. Jeżeli wziąć pod uwagę tylko część dewiatorową, funkcję relaksacji możemy przedstawić w postaci:

$$g(t) = \sum_{m=1}^N G_m e^{-\beta_m t} \quad (5)$$

Konieczne jest ustalenie z ilu podstawowych gałęzi Maxwella będzie składał się model. Program Ls-Dyna umożliwia wybranie od jednej do sześciu gałęzi. Następnie należy określić parametry modelu, tj. moduły ścinania G_m oraz parametry opóźnienia β_m dla poszczególnych gałęzi modelu.

Model Maxwella wykazuje sprężyste odkształcenie natychmiastowe, opóźnienie sprężyste i lepkie płynięcie. Pozwala tym samym na odwzorowanie trwałych deformacji.

Procedura doboru parametrów modelu

Dane eksperymentalne przedstawione w tabl. 2-6 i 2-7 tworzą zbiór modułów zespolonych zależnych od częstotliwości obciążenia. Podobny zestaw modułów zespolonych może być określony dla struktury reologicznej przedstawionej na rys. 2-23, ale zależny będzie nie tylko od częstości ale również od parametrów modelu G_m oraz β_m .

Podstawowy problem polega na dobraniu takich parametrów modelu, aby różnica pomiędzy wynikami eksperymentu oraz wartościami uzyskiwanymi na podstawie modelu matematycznego była jak najmniejsza. Możemy zatem sformułować zadanie optymalizacji i poszukiwać takiego optymalnego zestawu parametrów poszczególnych gałęzi modelu dla którego błąd będzie najmniejszy.

Tak postawione zadanie zostało rozwiązane za pomocą metody najmniejszych kwadratów oprogramowanej w pakiecie Matlab. Parametry modelu zostały dobrane oddzielnie dla części kulistej i dewiatorowej. Obliczenia wykazały, że najlepsze rezultaty otrzymano dla struktury reologicznej złożonej z pięciu gałęzi Maxwella.

Dobre parametry modelu

Otrzymany w wyniku optymalizacji zestaw parametrów materiałowych zamieszczono w tabl. 2-8 i 2-9.

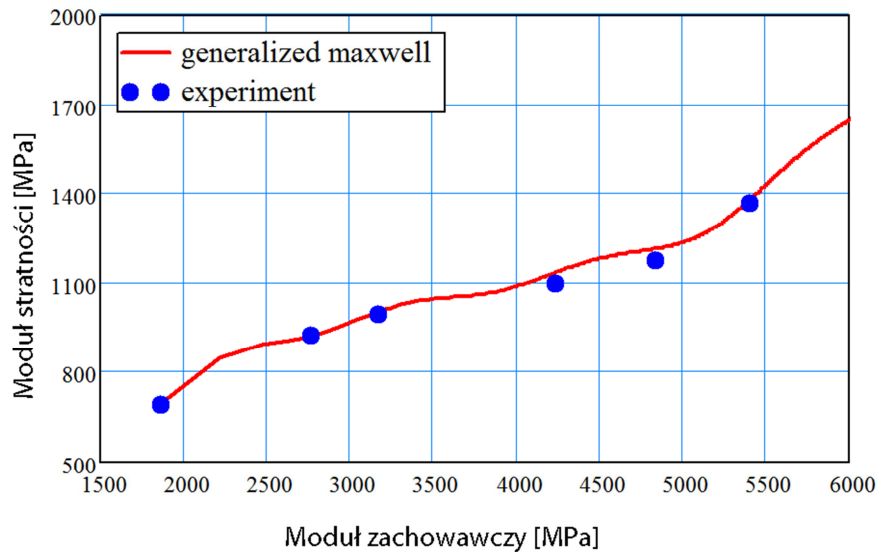
Tablica 2-8. Wyniki optymalizacji parametrów uogólnionego modelu Maxwella. Mieszanka mineralno-asfaltowa (TYP-1)

N	Część kulista		Część dewiatorowa	
	K_m	b_m	G_m	b_m
1	923	1.31905	426	1.31905
2	1391	0.05711	642	0.05711
3	1068	45.75000	493	45.75000
4	2626	450.14286	1212	450.14286
5	945	8.04255	436	8.04255

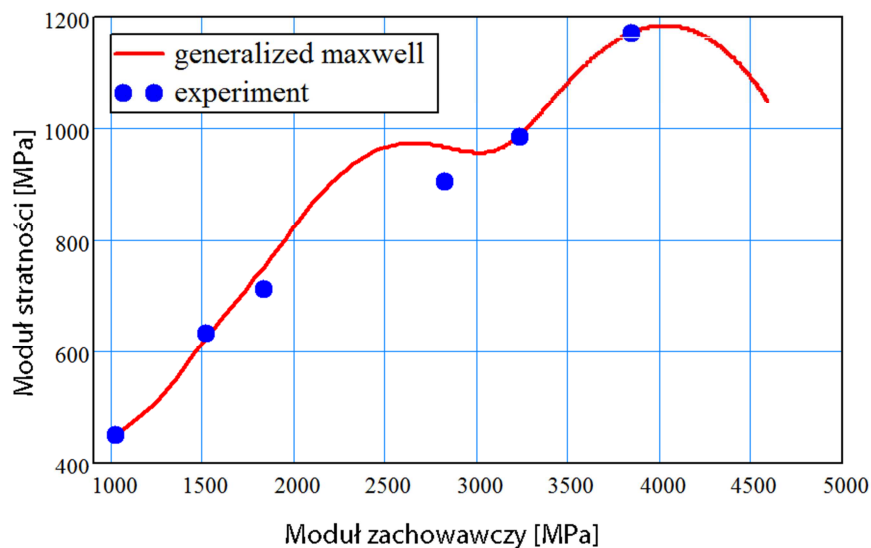
Tablica 2-9. Wyniki optymalizacji parametrów uogólnionego modelu Maxwella. Mieszanka mineralno-asfaltowa (TYP-2)

N	Część kulista		Część dewiatorowa	
	K_m	b_m	G_m	b_m
1	482	3.50303	222	3.50303
2	500	0.55762	231	0.55762
3	1090	19.23529	503	19.23529
4	1738	208.5000	802	208.5000
5	556	0.00093	257	0.00093

Porównania wyników eksperymentalnych z obliczonymi na podstawie modelu matematycznego możemy dokonać na podstawie rys. 2-24 i rys. 2-25. Przedstawiono na nich charakterystykę częstotliwościowo-fazową obu mieszanek mineralno-asfaltowych, czyli tak zwaną charakterystykę Nyquista. Wykres stworzono we współrzędnych kartezjańskich odkładając na osi odciętych część rzeczywistą modułu zespolonego, a na osi rzędnych część urojoną modułu zespolonego.



Rys. 2-24. Wyniki dopasowania krzywej uogólnionego modelu Maxwella (model 5 gałęziowy). Mieszanka Typ-1



Rys. 2-25. Wyniki dopasowania krzywej uogólnionego modelu Maxwella (model 5 gałęziowy). Mieszanka Typ-2

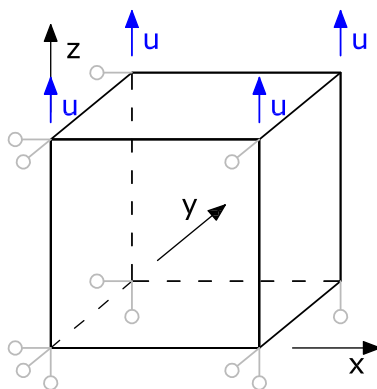
Testy materiałowe

W tym rozdziale przedstawiono analizę numeryczną zachowania modelu materiałowego mieszanek mineralno-asfaltowych pod wpływem różnych obciążeń. Przeprowadzono symulacje numeryczne próby cyklicznego rozciągania oraz badanie relaksacji naprężeń w próbie jednoosiowego rozciągania. Symulacje statyczne, bez uwzględnienia bezwładności, przeprowadzone zostały zarówno dla mieszanki TYP-1 i TYP2. Sześcienne próbka poddana została obciążeniu (sterowanie przemieszczeniem) o amplitudzie dobranej tak, aby odpowiedź materiału można było analizować w ramach teorii małych odkształceń. Wykorzystano stałe materiałowe określone na wcześniejszym etapie rozwiązań.

Dziedzina częstotliwości

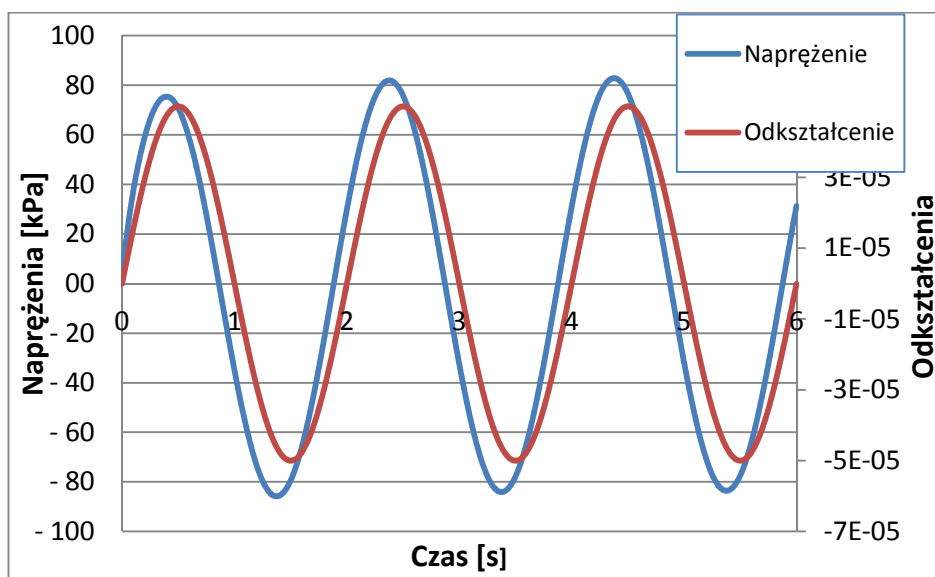
Badano odpowiedź modelu w zależności od częstotliwości wymuszenia. Próbkę poddana została cyklicznemu obciążeniu (sterowanie przemieszczeniem). Badany model ma kształt sześcianu i poddany jest prostemu rozciąganiu w kierunku pionowym. Schemat podparcia i obciążenia przedstawia rys. 2-26. Model stanowi jeden trójwymiarowy element o kształcie sześcianu, liniowych funkcjach kształtu i zredukowanym całkowaniu (jeden punkt całkowania).

Wymuszenie jest dobrane tak, aby maksymalne odkształcenie materiału osiągało wartość $5 \cdot 10^{-5}$ (50 mm/mm). W rzeczywistej konstrukcji materiał doznaje odkształceń podobnego rzędu oraz możliwa jest analiza w ramach teorii małych odkształceń.

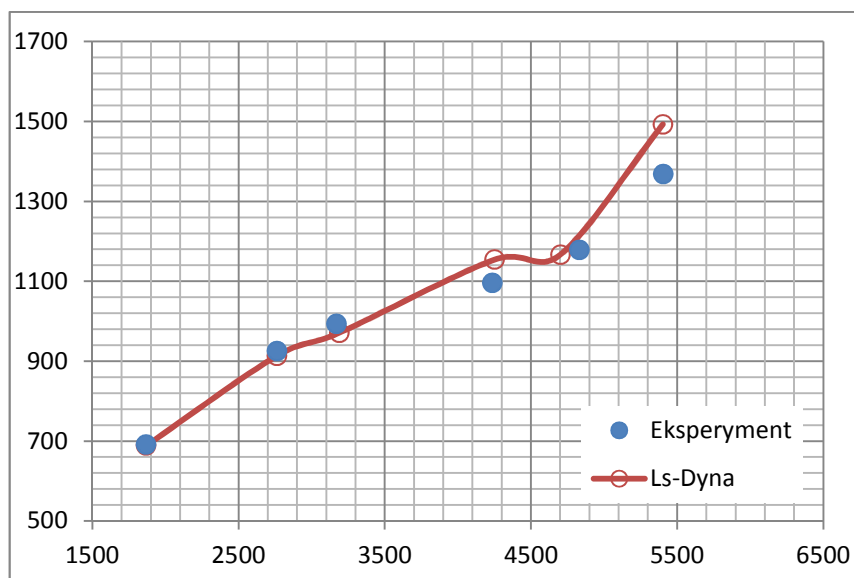


Rys. 2-26. Schemat podparcia i obciążenia sześciennej próbki

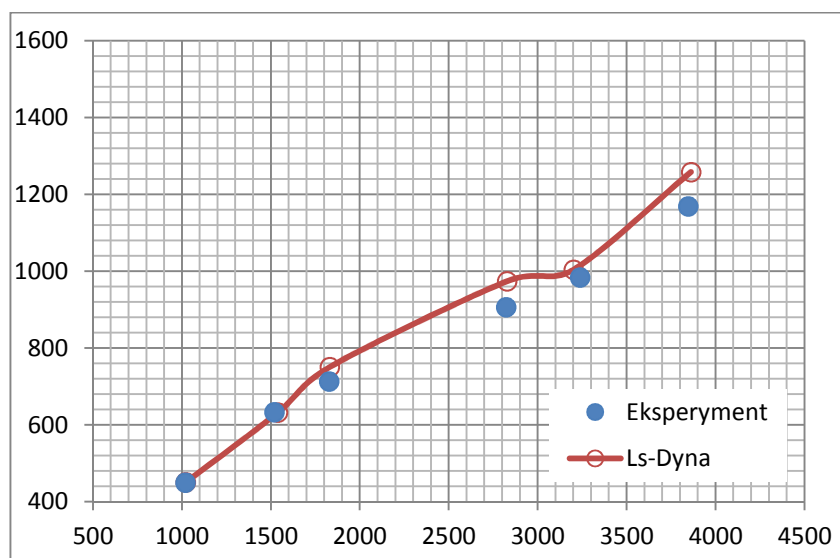
W wyniku przeprowadzonych symulacji otrzymano dla różnych częstotliwości wykresy naprężeń i odkształceń. Przykładowe porównanie wykresów naprężeń i odkształceń (przeskalowane) uzyskane dla wymuszenia z częstotliwością 0.5 Hz, przedstawiono rys. 2-27. Możliwe było na ich podstawie wyliczenie wartości modułu zespolonego i przesunięcia fazowego. Uzyskane wartości porównano z wynikami eksperymentu, na podstawie których dobierano współczynniki modelu. Zestawienie w postaci wykresów przedstawiono na rys. 2-28 i rys. 2-29. Dla niskich częstotliwości [0.1 Hz; 0.5 Hz; 1 Hz] uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników. Kilkoprocentowe rozbieżności jakie pojawiły się dla wyższych częstotliwości można wytłumaczyć prawdopodobnie błędami w całkowaniu numerycznym równań.



Rys. 2-27. Lepkosprężyste zachowanie mieszanki mineralno-asfaltowej. Przesunięcie fazowe pomiędzy naprężeniem a odkształceniem



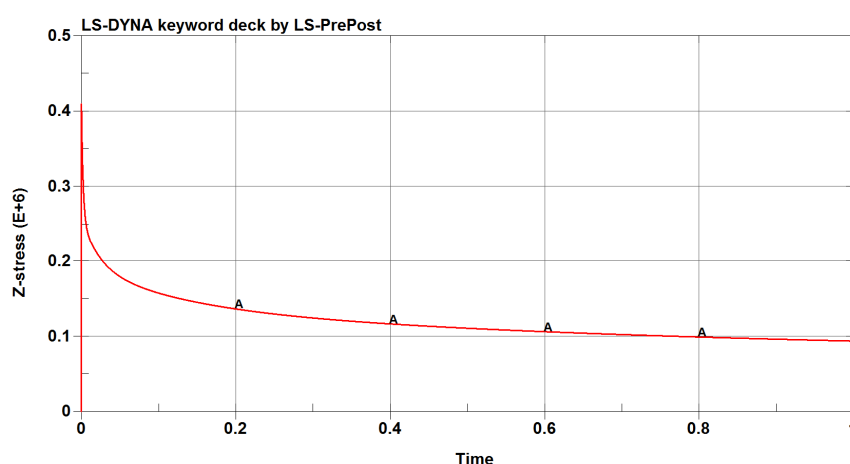
Rys. 2-28. Wyniki testów numerycznych uogólnionego modelu Maxwella (model 5- gałęziowy). Charakterystyka Nyquista. Mieszanka Typ-1.



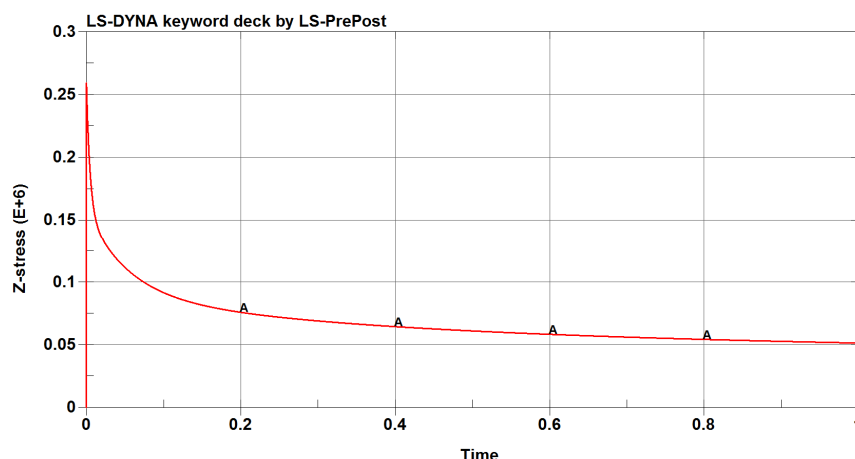
Rys. 2-29. Wyniki testów numerycznych uogólnionego modelu Maxwella (model 5- gałęziowy). Charakterystyka Nyquista. Mieszanka Typ-2

Relaksacja naprężeń

Relaksacją nazywa się zjawisko zanikania stanu naprężenia przy wymuszonym odkształceniu. Proces relaksacji naprężeń to jeden z podstawowych sposobów ujawniania cech reologicznych materiałów. W celu wyznaczenia relaksacji naprężeń materiału, próbka odkształcana jest do odpowiedniej wartości odkształcenia i mierzony jest spadek naprężenia w wydłużonym czasie ekspozycji próbki w stałej temperaturze. Pomiar relaksacji naprężeń dla próbek o stałym odkształceniu, pozwala na wyznaczenie charakterystycznego czasu relaksacji materiału i czasowej zależności szybkości relaksacji. Pomiar relaksacji prowadzono w próbie jednoosiowego rozciągania. Na początku analizy wymuszono stałe przemieszczenie pionowe o takiej wartości, aby odkształcenie na kierunku działania przemieszczenia wynosiło $5 \cdot 10^{-5}$ (50 mm/mm). Wyniki symulacji dla obu mieszanek przedstawiono na rys. 2-30 i rys. 2-31.



Rys. 2-30. Zmiany wartości naprężeń normalnych w czasie. Mieszanka Typ-1

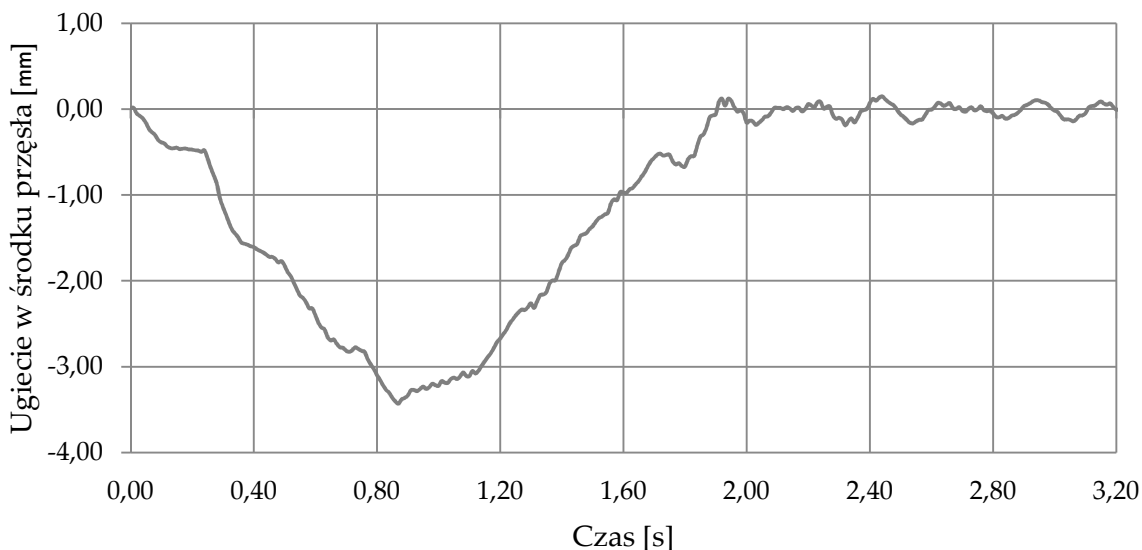


Rys. 2-31. Zmiany wartości naprężeń normalnych w czasie. Mieszanka Typ-2

2.2.5 Wyniki obliczeń

Wpływ stopnia szczepności

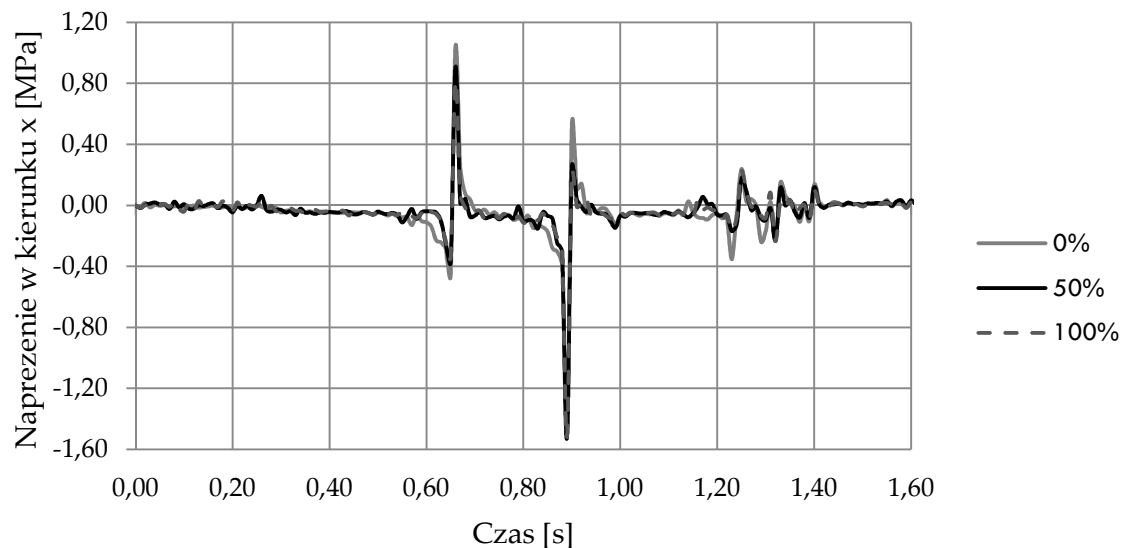
Prezentowane wyniki dotyczą przypadku przejazdu jednego pojazdu członowego z prędkością 60 km/h. Rozpatrzono 3 przypadki szczepności nawierzchni mostowej z konstrukcją mostu: 0%, 50% oraz 100%. Na rys. 2-32 przedstawiono historię ugięcia środka przęsła pod obciążeniem pochodzącym od pojazdu. W tym przypadku dla wszystkich stopni szczepności otrzymano takie same historie ugięcia.



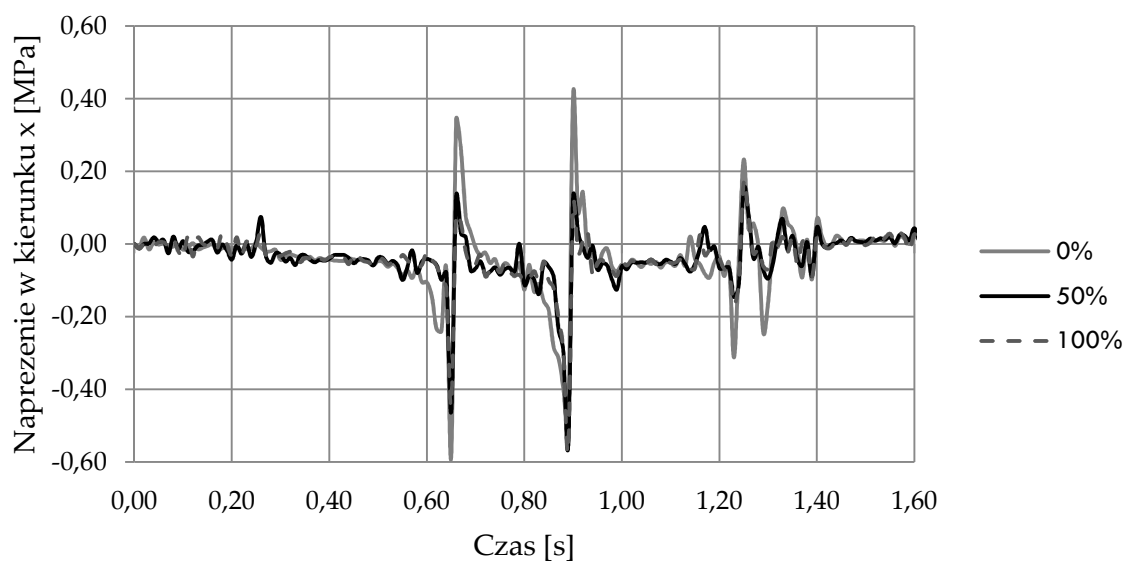
Rys. 2-32. Zmienność w czasie ugięcia środka przęsła pod działaniem przejeżdżającego pojazdu członowego o masie 40 ton

Wyniki w postaci odkształceń oraz naprężeń zapisano w środku rozpiętości przęsła pod miejscem przejazdu koła pojazdu. Prezentowane są wyniki dla elementów znajdujących się na górze oraz na dole obu warstw asfaltowych.

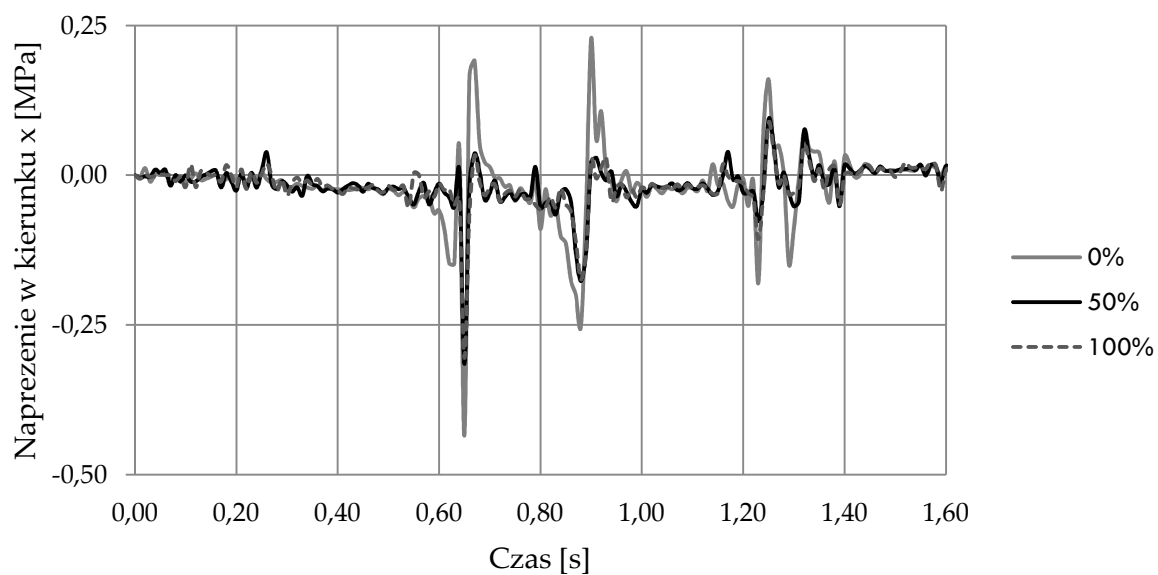
Na rys. 2-33 do rys. 2-36 przedstawiono naprężenia w kierunku jazdy pojazdu oznaczone jako σ_x odpowiednio w elementach znajdujących się na górze i dole obu warstw asfaltowych. Przedstawiono wyniki dla różnego stopnia szczepności nawierzchni asfaltowych do betonowego pomostu.



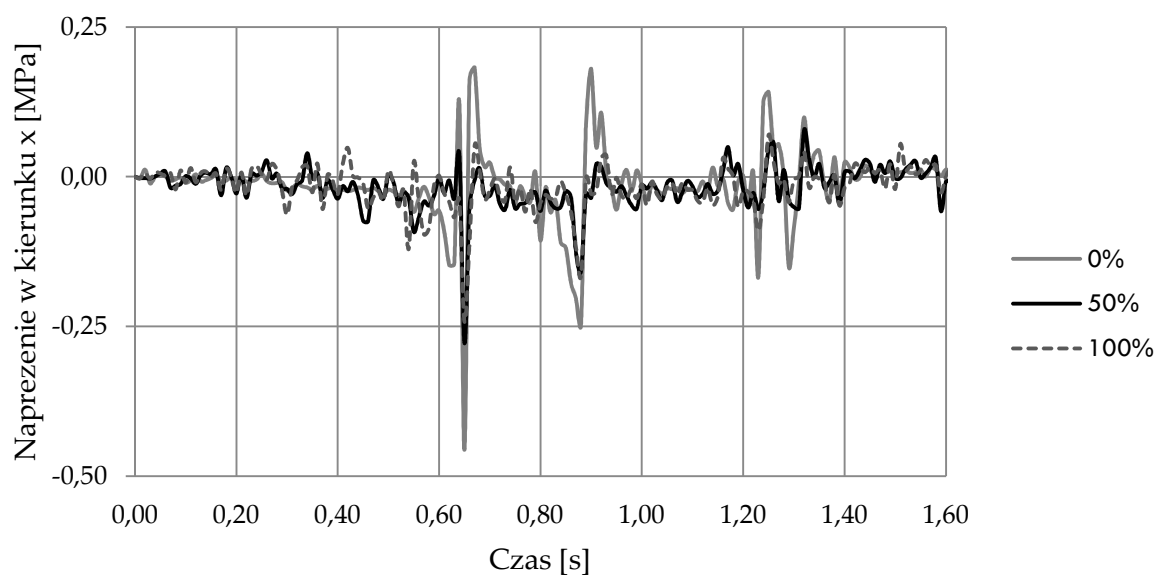
Rys. 2-33. Zmienność w czasie naprężenia σ_x górnego elementu warstwy SMA w kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia szczepności



Rys. 2-34. Zmienność w czasie naprężenia σ_x dolnego elementu warstwy SMA w kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia szczepności

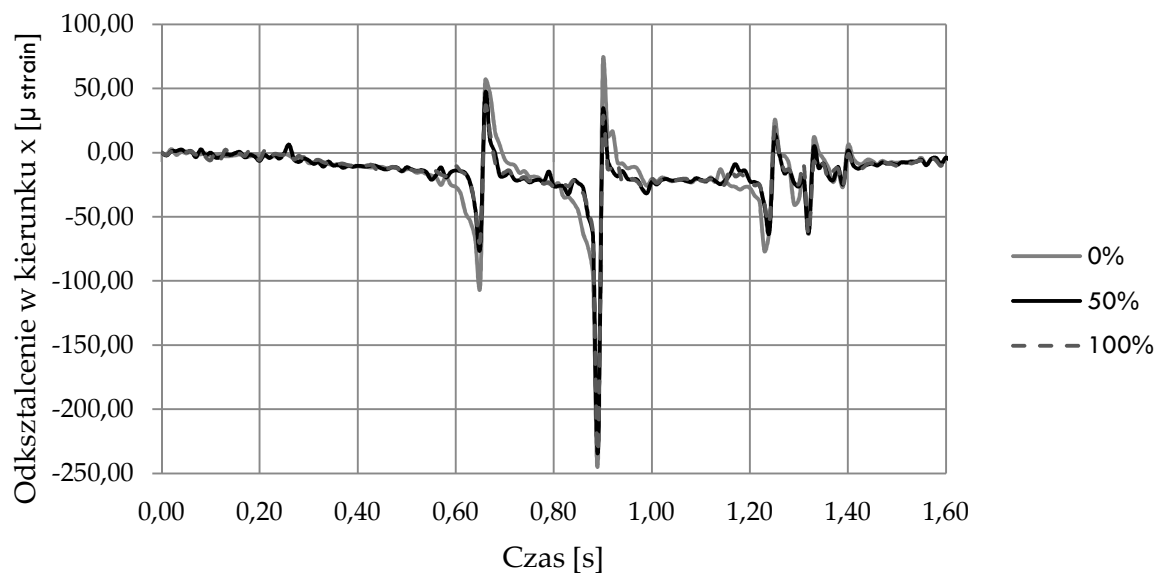


Rys. 2-35. Zmienność w czasie naprężenia σ_x górnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia szepności

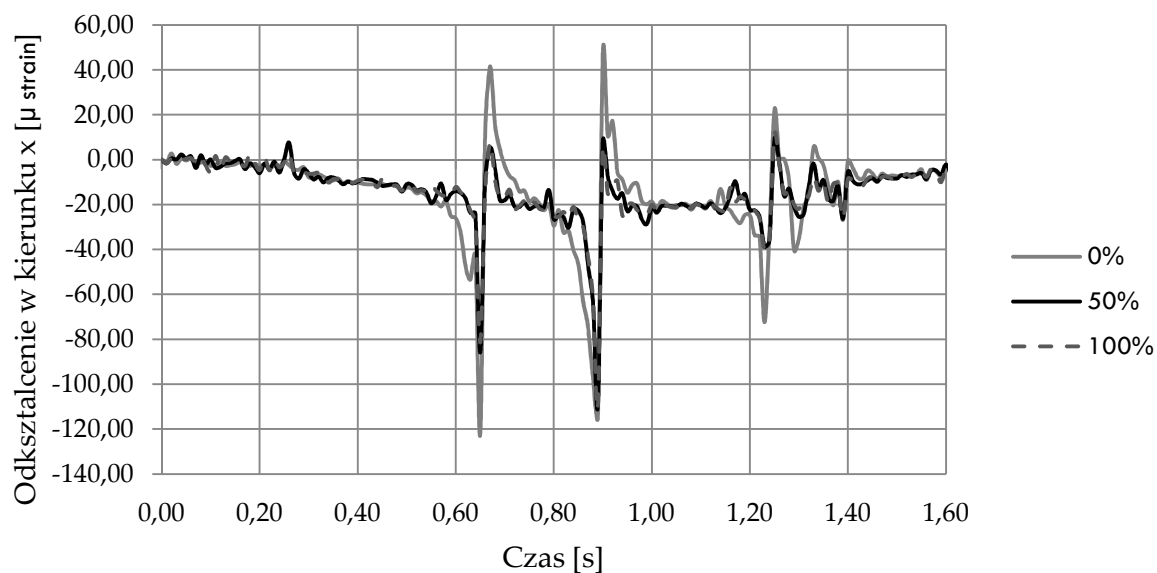


Rys. 2-36. Zmienność w czasie naprężenia σ_x dolnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia szepności

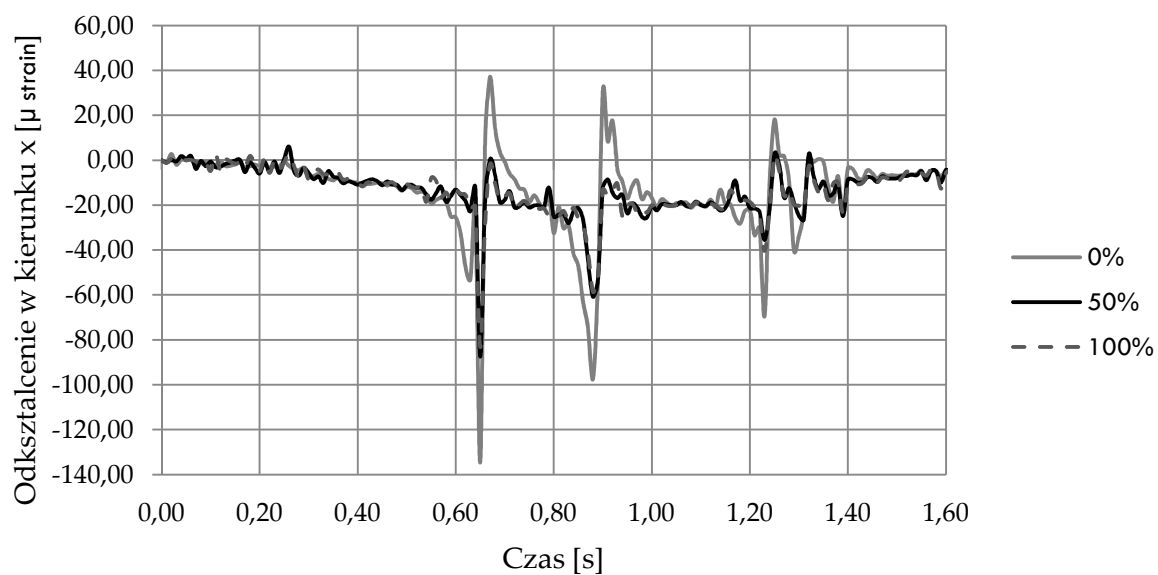
Na rys. 2-37 do rys. 2-40 przedstawiono odkształcenia w kierunku ruchu pojazdu oznaczone jako ε_x odpowiednio w górnych i dolnych elementach obu warstw asfaltowych. Przedstawiono wyniki dla różnego stopnia szczepności warstwa nawierzchni asfaltowych do konstrukcji mostu.



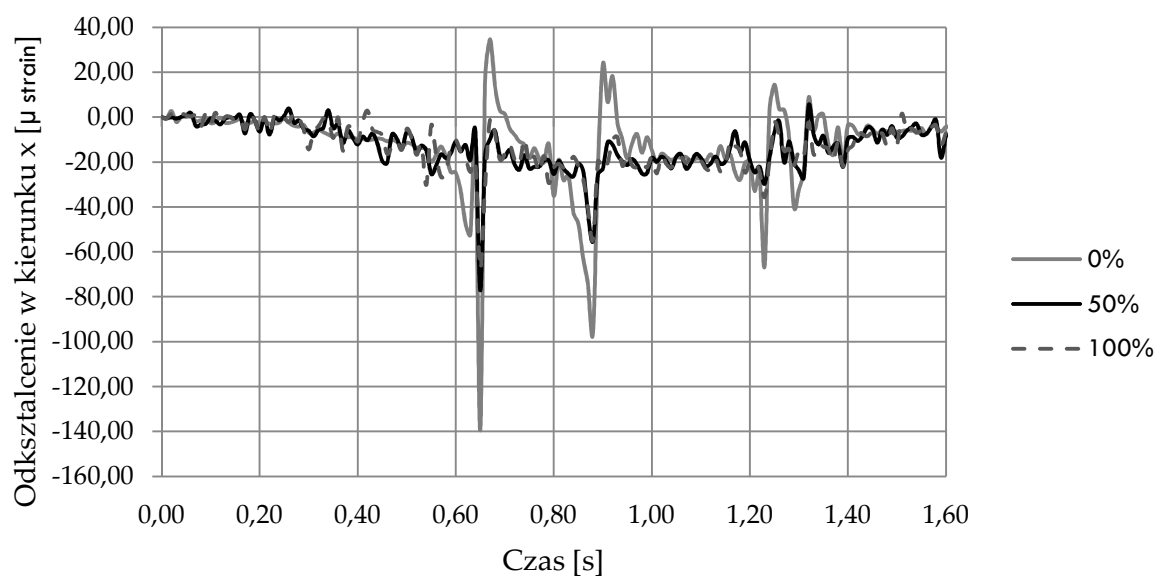
Rys. 2-37. Zmienność w czasie odkształcenia ε_x górnego elementu warstwy SMA w kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia szczepności



Rys. 2-38. Zmienność w czasie odkształcenia ε_x dolnego elementu warstwy SMA w kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia szczepności

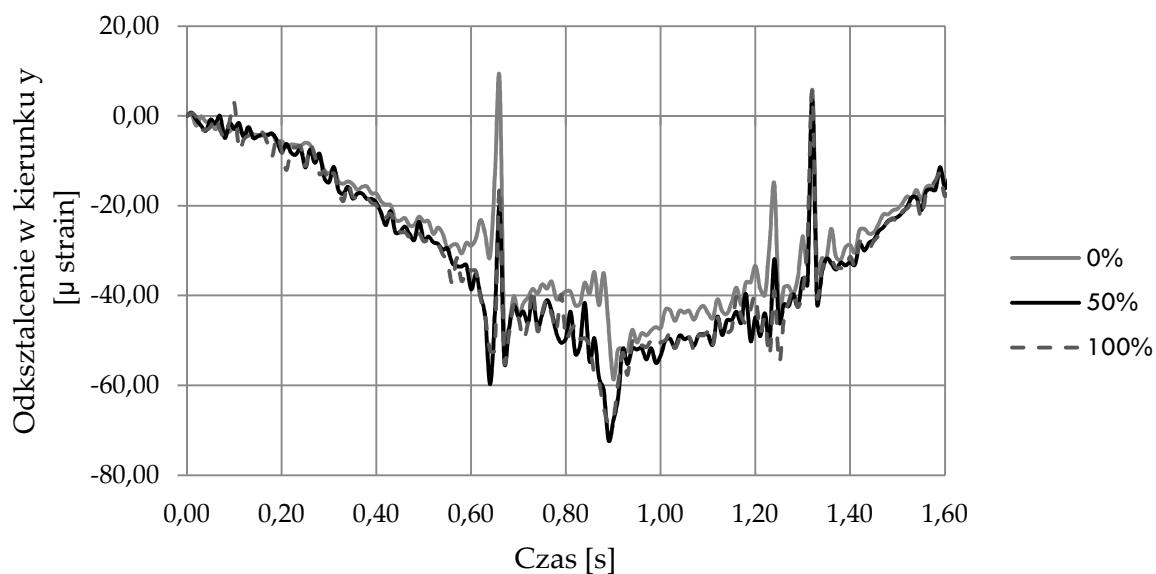


Rys. 2-39. Zmienność w czasie odkształcenia ϵ_x górnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia szepności

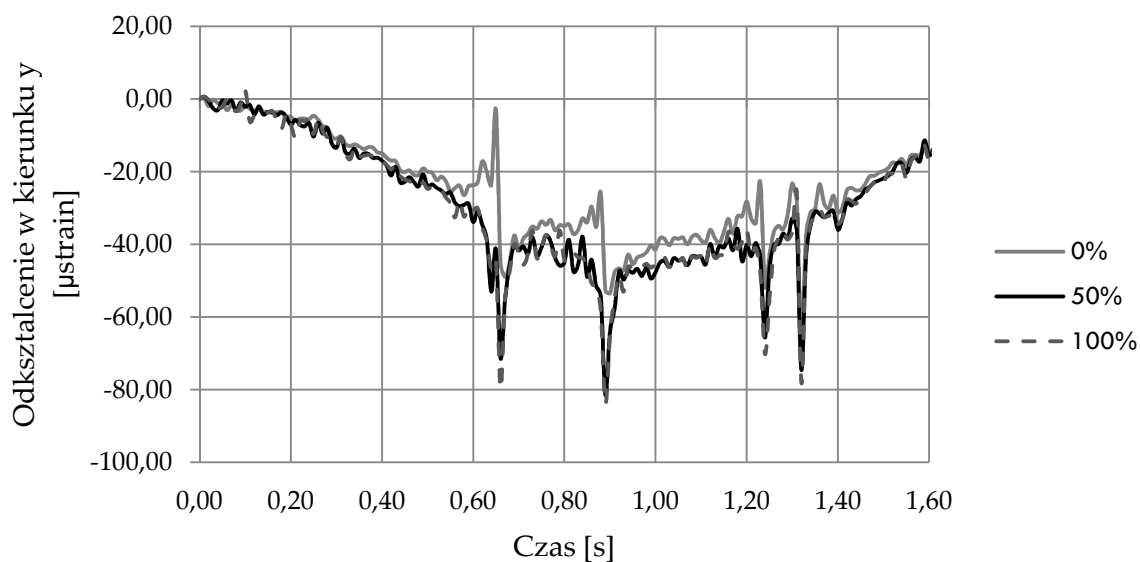


Rys. 2-40. Zmienność w czasie odkształcenia ϵ_x dolnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia szepności

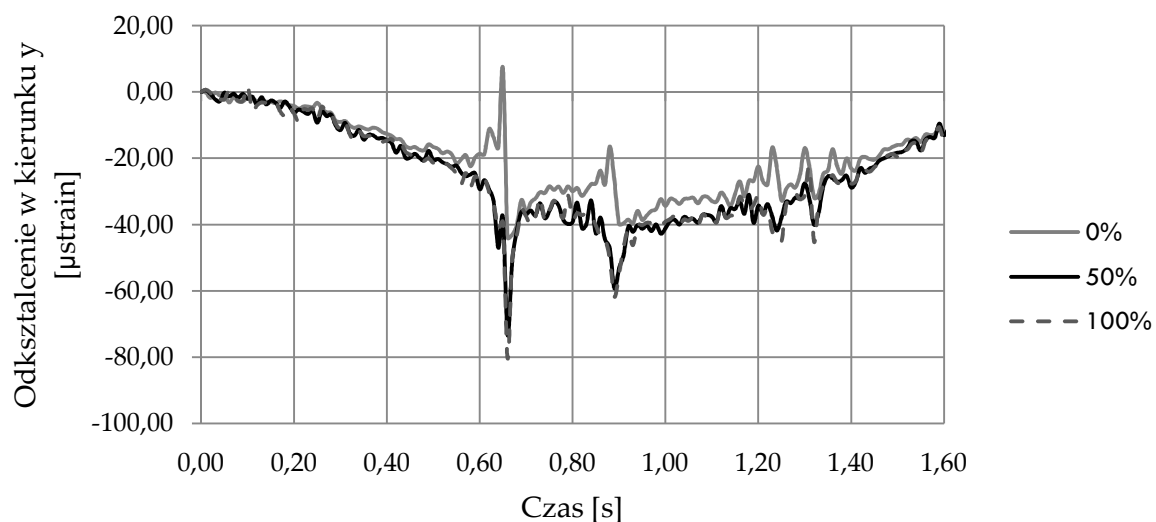
Na rys. 2-41 do rys. 2-44 przedstawiono odkształcenia w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu pojazdu, oznaczone jako ε_y elementach znajdujących się na górze i na dole warstw asfaltowych. Przedstawiono wyniki dla różnego stopnia szczepności warstwa nawierzchni asfaltowych do konstrukcji mostu.



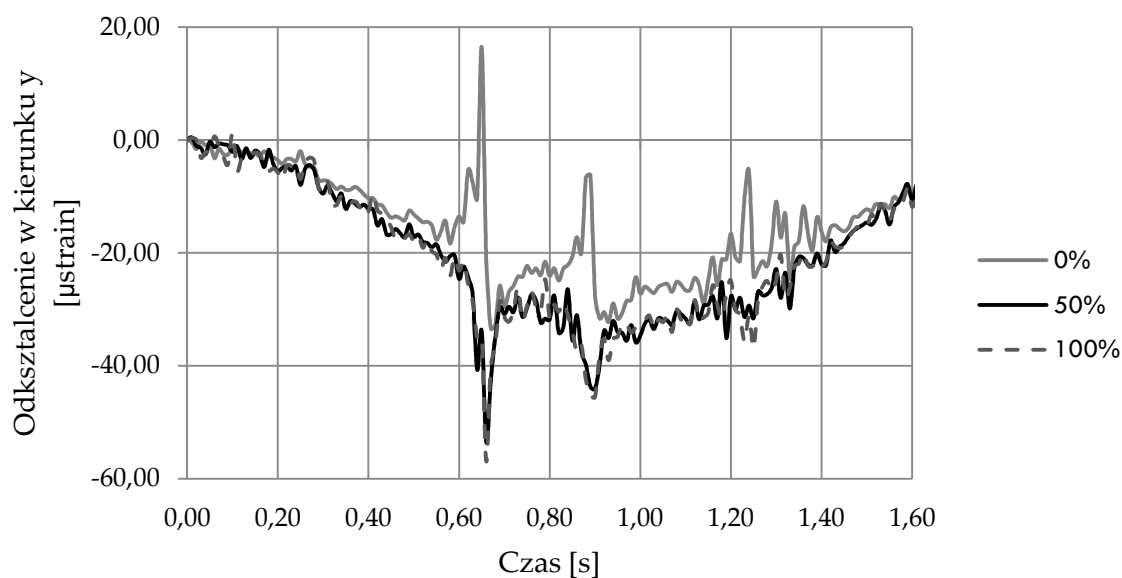
Rys. 2-41. Zmienność w czasie odkształcenia ε_y górnego elementu warstwy SMA w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia szczepności



Rys. 2-42. Zmienność w czasie odkształcenia ε_y dolnego elementu warstwy SMA w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia szczepności



Rys. 2-43. Zmienność w czasie odkształcenia ε_y górnego elementu warstwy MA w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia szepności



Rys. 2-44. Zmienność w czasie odkształcenia ε_y dolnego elementu warstwy MA w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia szepności

W tabl. 2-10 zestawiono wartości ekstremalne naprężeń i odkształceń na górze oraz dole obu warstw asfaltowych. Uwzględniono trzy przypadki szepności nawierzchni asfaltowej z płytą betonowego mostu (0%, 50% i 100%).

Tablica 2-10. Wartości ekstremalne naprężeń i odkształceń w warstwach asfaltowych

			Szczepność 0%	Szczepność 50%	Szczepność 100%
Odkształcenie w kierunku x [μstrain]	SMA - góra	MAX	68,6	44,7	34,7
		MIN	-242	-233	-233
	SMA - dół	MAX	47,3	8,7	10,9
		MIN	-122	-109	-110
	MA - góra	MAX	37,2	6,02	3,89
		MIN	-134	-87,4	-83,2
	MA - dół	MAX	34,7	5,67	4,91
		MIN	-139	-77,1	-67,9
Odkształcenie w kierunku y [μstrain]	SMA - góra	MAX	8,38	3,52	5,49
		MIN	-58,6	-72,2	-68,5
	SMA - dół	MAX	1,38	2,10	3,65
		MIN	-66,9	-81,4	-83,9
	MA - góra	MAX	7,04	2,84	3,35
		MIN	-43,9	-73,4	-80,3
	MA - dół	MAX	16,4	4,04	3,58
		MIN	-33,4	-53,5	-56,9
Naprężenie w kierunku x [MPa]	SMA - góra	MAX	1,04	0,904	0,809
		MIN	-1,50	-1,53	-1,52
	SMA - dół	MAX	0,401	0,150	0,169
		MIN	-0,588	-0,557	-0,565
	MA - góra	MAX	0,228	0,093	0,087
		MIN	-0,435	-0,315	-0,305
	MA - dół	MAX	0,183	0,077	0,069
		MIN	-0,456	-0,278	-0,242

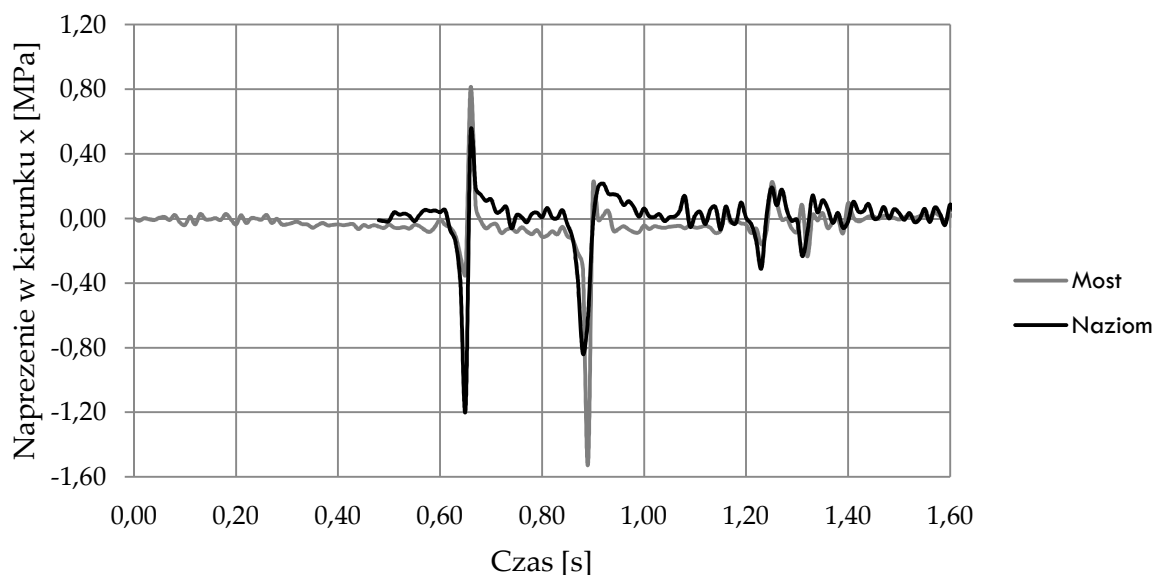
Porównanie z nawierzchnią na naziemie

W celu zbadania różnicy pomiędzy zachowaniem nawierzchni drogowej znajdującej się na obiekcie mostowym i na naziemie, przedstawiono porównanie wyników dla modelu o szczepności 100% z

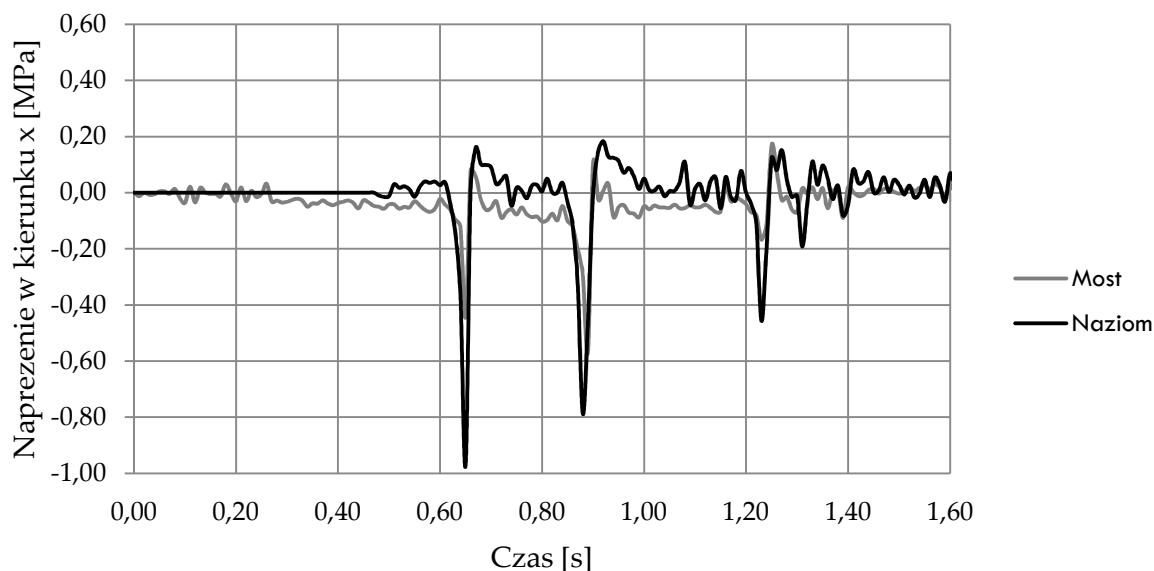
wynikami dla takich samych warstw asfaltowych znajdujących się na naziomiu. Prezentowane wyniki dotyczą przypadku przejazdu jednego pojazdu członowego z prędkością 60 km/h.

Wyniki w postaci odkształceń oraz naprężeń szczytywano w środku rozpiętości przęsła pod miejscem przejazdu koła pojazdu. Prezentowane wyniki dla elementów znajdujących się na górze oraz na dole obu warstw asfaltowych.

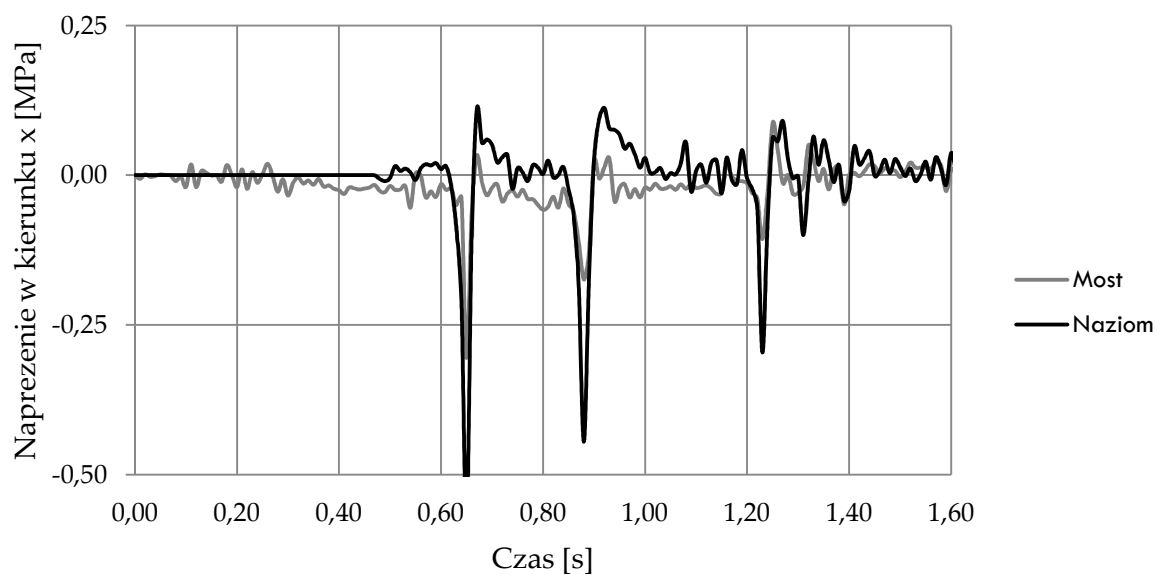
Na rys. 2-45 do rys. 2-48 przedstawiono naprężenia w kierunku jazdy pojazdu oznaczone jako σ_x odpowiednio w elementach znajdujących się na górze i dole obu warstw asfaltowych.



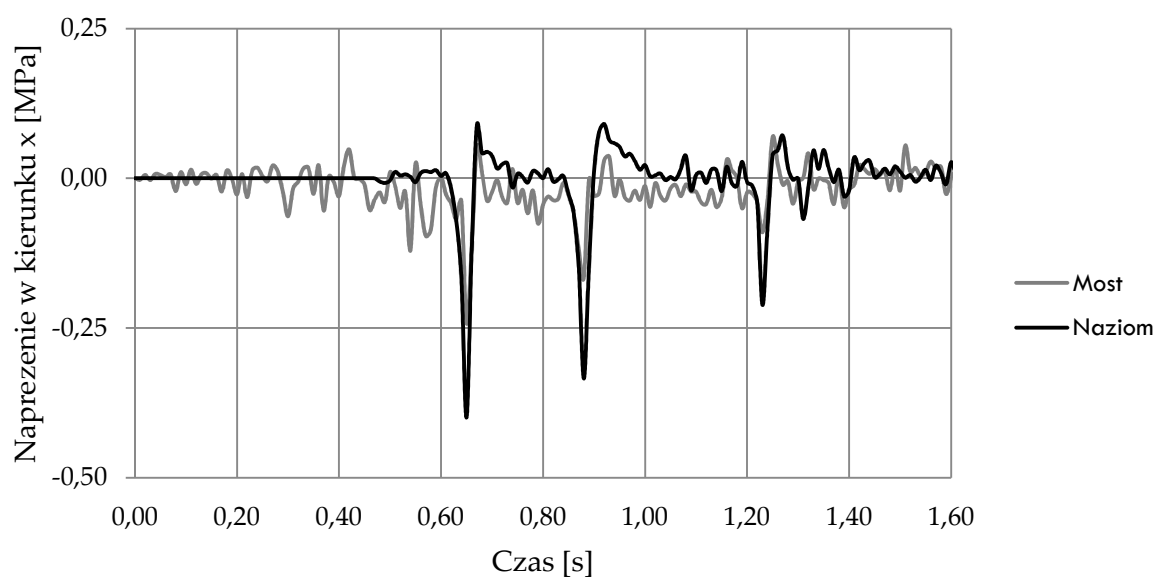
Rys. 2-45. Zmienność w czasie naprężenia σ_x górnego elementu warstwy SMA w kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomiu



Rys. 2-46. Zmienność w czasie naprężenia σ_x dolnego elementu warstwy SMA w kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomiu

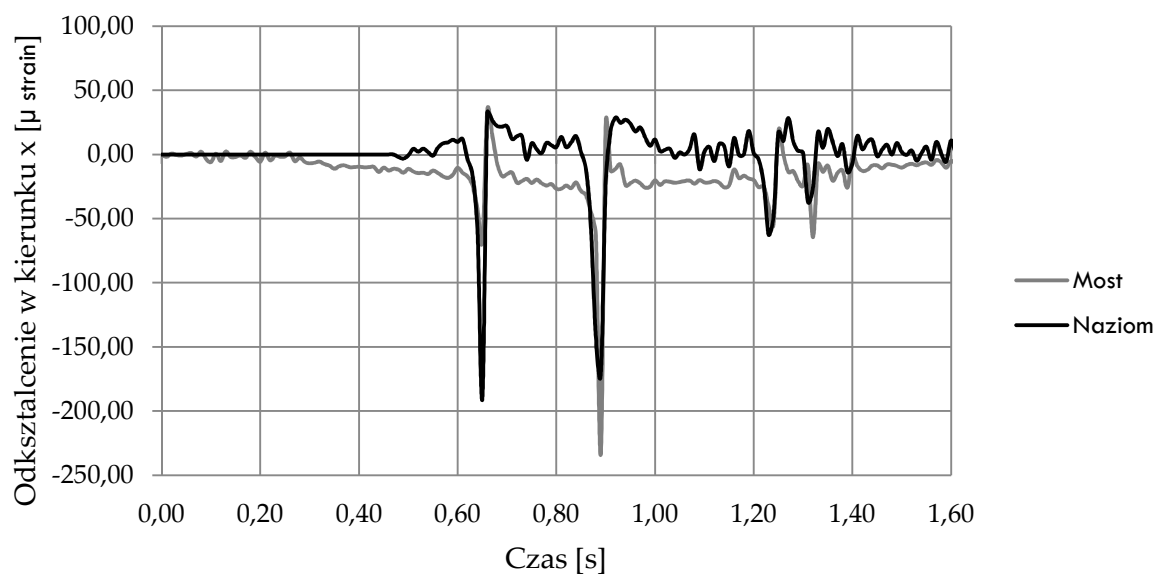


Rys. 2-47. Zmienność w czasie naprężenia σ_x górnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziemiu

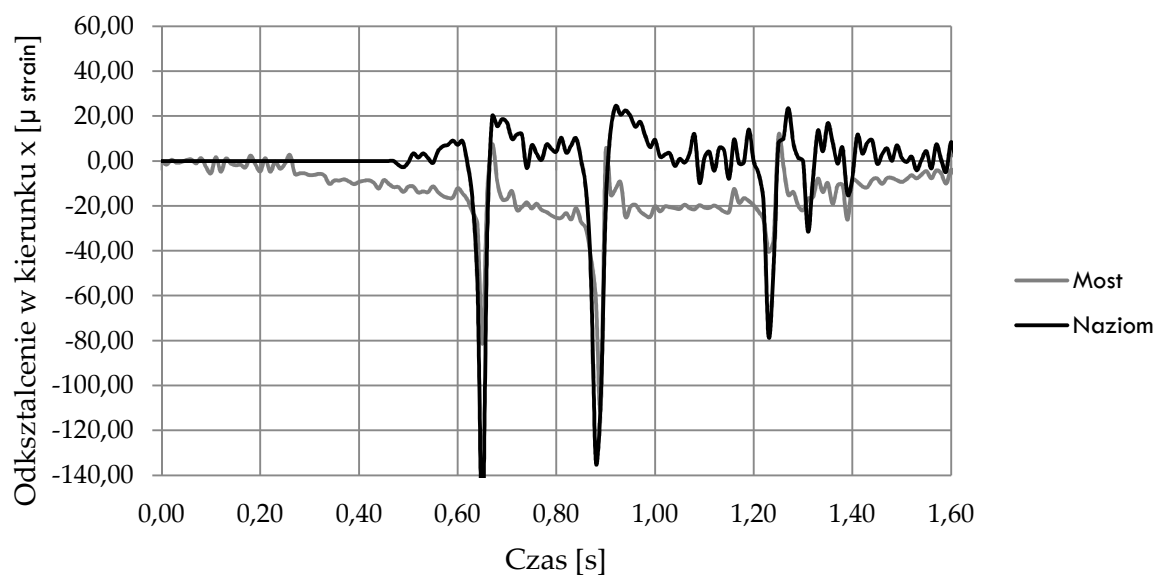


Rys. 2-48. Zmienność w czasie naprężenia σ_x dolnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziemiu.

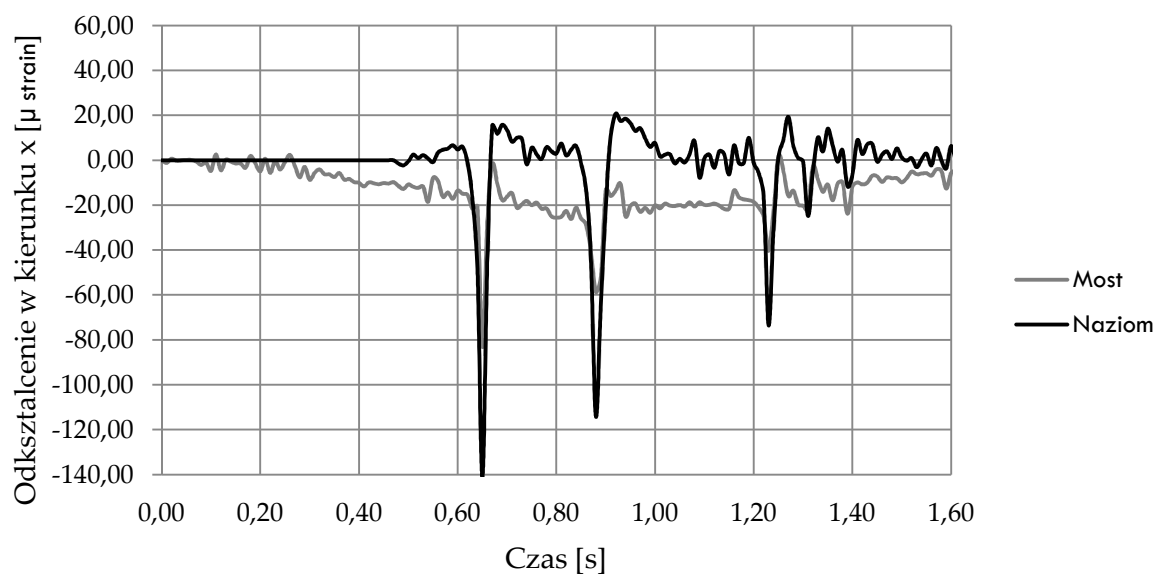
Na rys. 2-49 do rys. 2-52 przedstawiono odkształcenia w kierunku ruchu pojazdu oznaczone jako ε_x odpowiednio w górnych i dolnych elementach obu warstw asfaltowych. Przedstawiono wyniki dla nawierzchni znajdującej się na obiekcie mostowym oraz nawierzchni o takim samym układzie warstw asfaltowych znajdującej się na naziomiu.



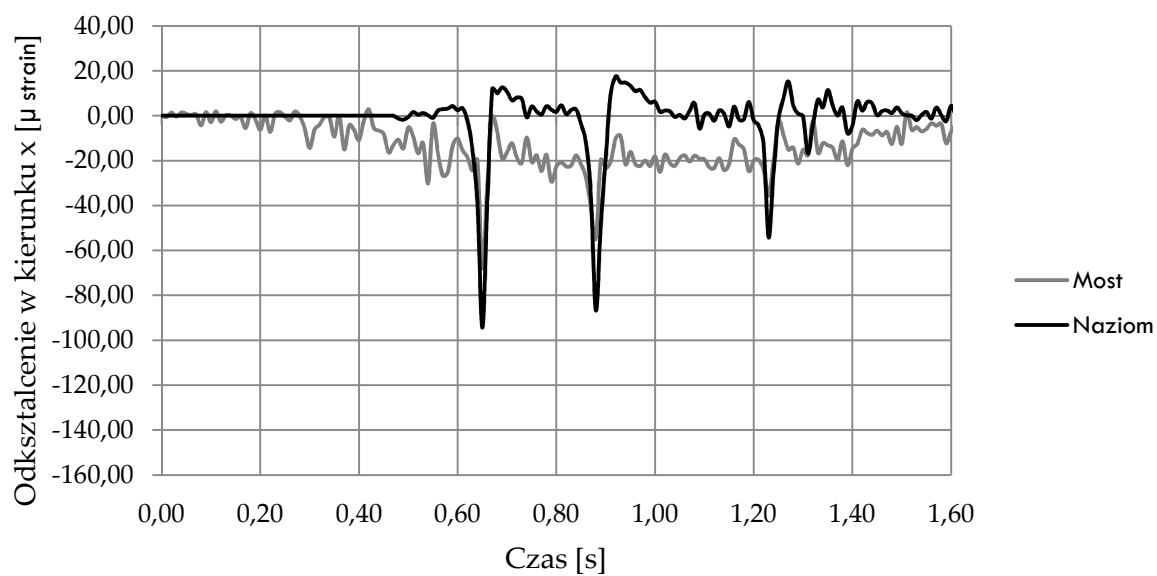
Rys. 2-49. Zmienność w czasie odkształcenia ε_x górnego elementu warstwy SMA w kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomie



Rys. 2-50. Zmienność w czasie odkształcenia ε_x dolnego elementu warstwy SMA w kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomie

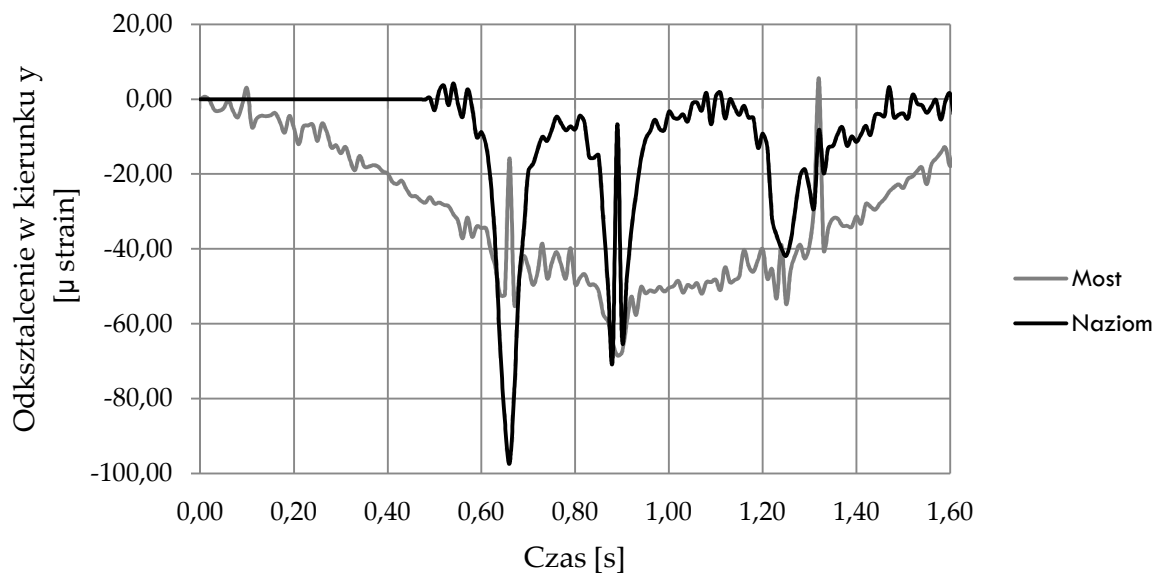


Rys. 2-51. Zmienność w czasie odkształcenia ϵ_x górnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziemiu

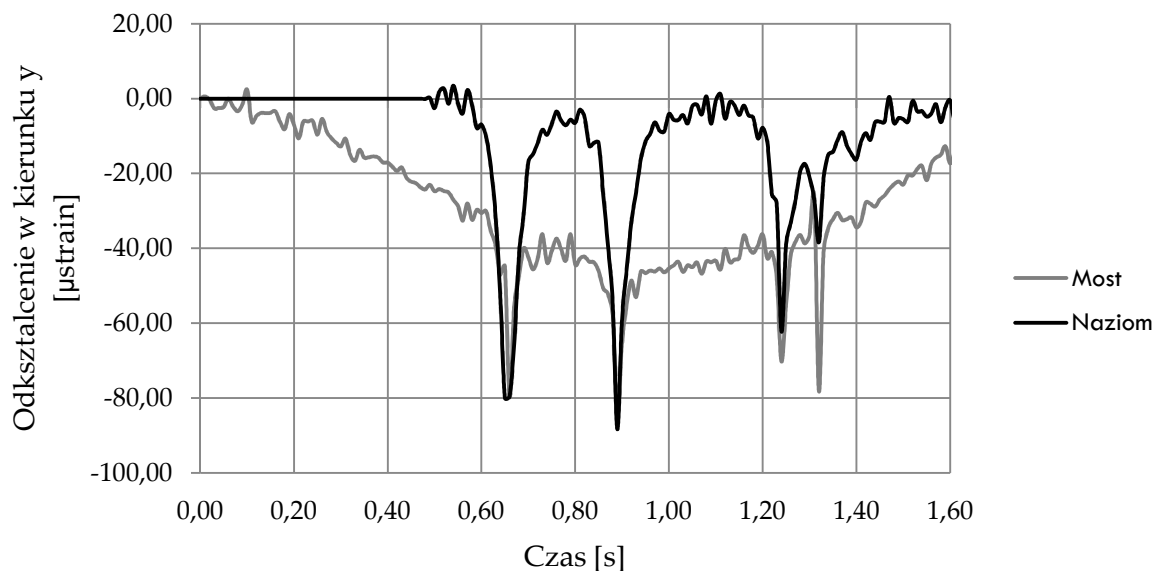


Rys. 2-52. Zmienność w czasie odkształcenia ϵ_x dolnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziemiu

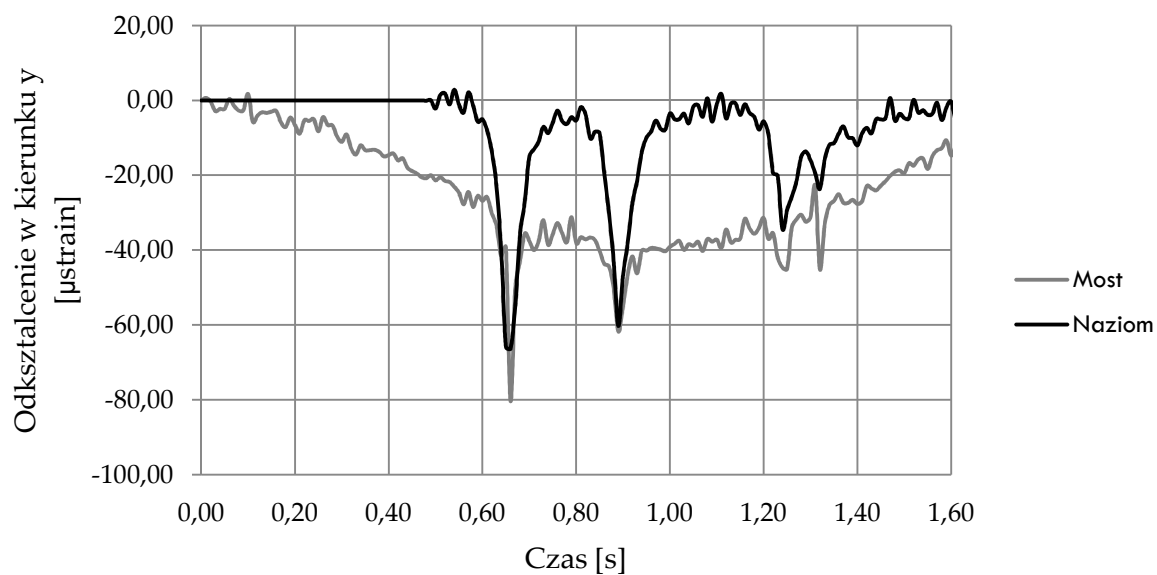
Na rys. 2-53 do rys. 2-56 przedstawiono odkształcenia w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu pojazdu, oznaczone jako ε_y , w elementach na górze i na dole warstw asfaltowych, dla nawierzchni znajdującej się na obiekcie mostowym oraz dla nawierzchni na naziomiu.



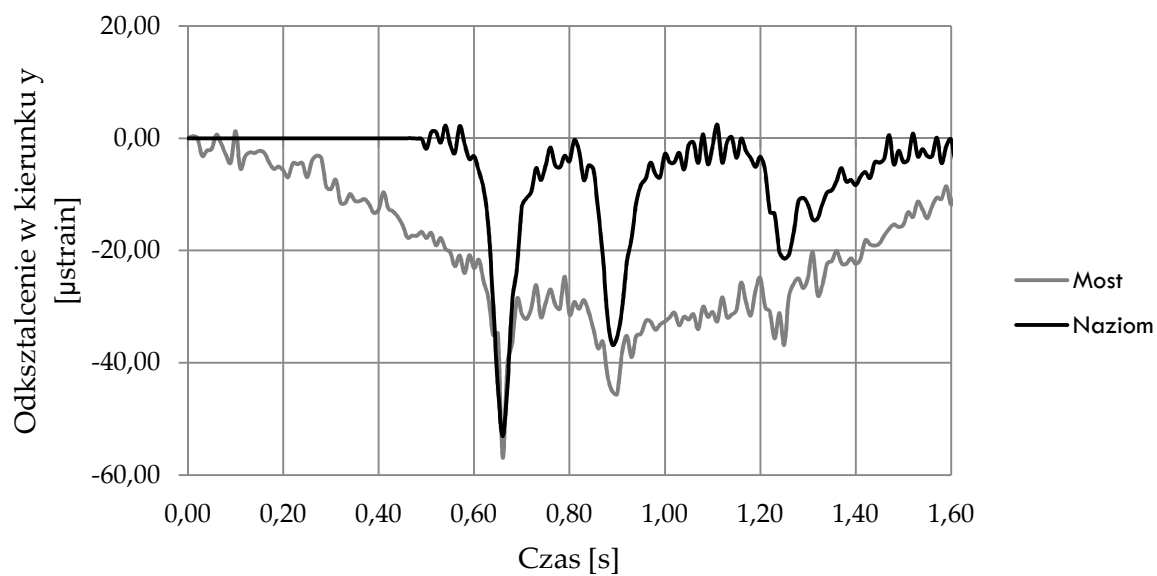
Rys. 2-53. Zmienność w czasie odkształcenia ε_y górnego elementu warstwy SMA w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomie



Rys. 2-54. Zmienność w czasie odkształcenia ε_y dolnego elementu warstwy SMA w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomie



Rys. 2-55. Zmienność w czasie odkształcenia ϵ_y górnego elementu warstwy MA w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomie



Rys. 2-56. Zmienność w czasie odkształcenia ϵ_y dolnego elementu warstwy MA w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomie

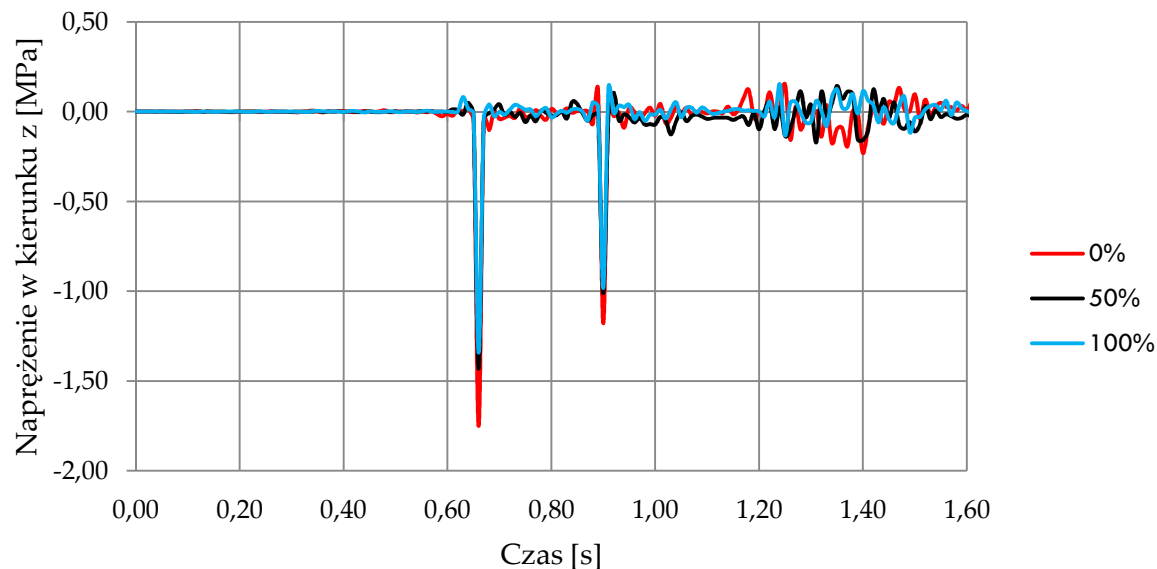
W tabl. 2-11 przedstawiono porównanie maksymalnych wartości naprężeń i odkształceń uzyskanych na naziomie i moście (w porównaniu wykorzystano model MES mostu z 100% szczepnością nawierzchni z konstrukcją mostu).

Tablica 2-11. Zestawienie ekstremalne naprężeń i odkształceń uzyskanych na naziomie i moście

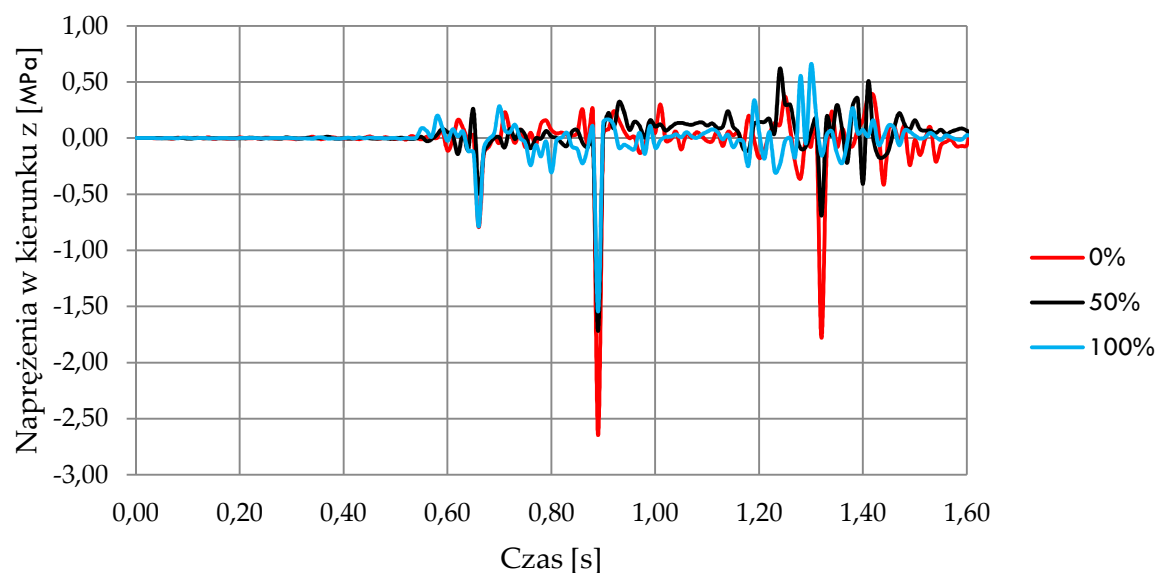
			Wyniki z naziomu	Wyniki z mostu
Odkształcenie w kierunku x [μstrain]	SMA - góra	MAX	32,7	34,7
		MIN	-190	-233
	SMA - dół	MAX	24,4	10,9
		MIN	-163	-110
	MA - góra	MAX	20,7	3,89
		MIN	-141	-83,2
	MA - dół	MAX	17,5	4,91
		MIN	-94,4	-67,9
Odkształcenie w kierunku y [μstrain]	SMA - góra	MAX	4,21	5,49
		MIN	-97,3	-68,5
	SMA - dół	MAX	3,47	3,65
		MIN	-88,4	-83,9
	MA - góra	MAX	2,83	3,35
		MIN	-66,4	-80,3
	MA - dół	MAX	2,39	3,58
		MIN	-53,1	-56,9
Naprężenie w kierunku x [MPa]	SMA - góra	MAX	0,522	0,809
		MIN	-1,18	-1,52
	SMA - dół	MAX	0,184	0,169
		MIN	-0,973	-0,565
	MA - góra	MAX	0,113	0,087
		MIN	-0,584	-0,305
	MA - dół	MAX	0,091	0,069
		MIN	-0,399	-0,242

Naprężenia pionowe σ_z

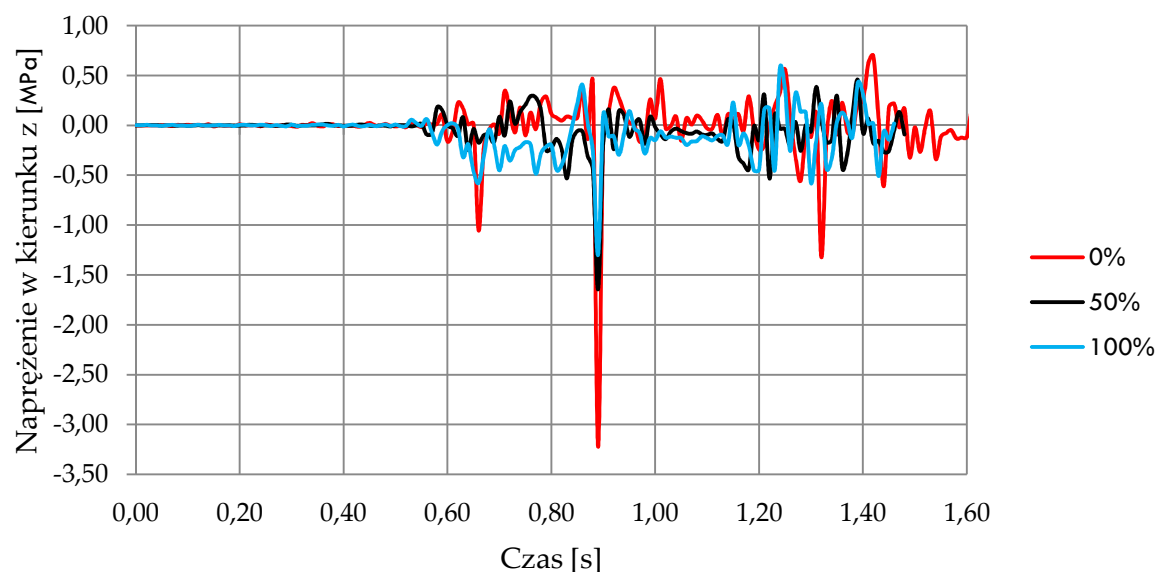
Na rys. 2-57 do rys. 2-60 przedstawiono naprężenia pionowe oznaczone jako σ_z odpowiednio w górnych i dolnych elementach skończonych obu warstw asfaltowych. Przedstawiono wyniki dla różnego stopnia szepności warstw nawierzchni asfaltowych do konstrukcji mostu.



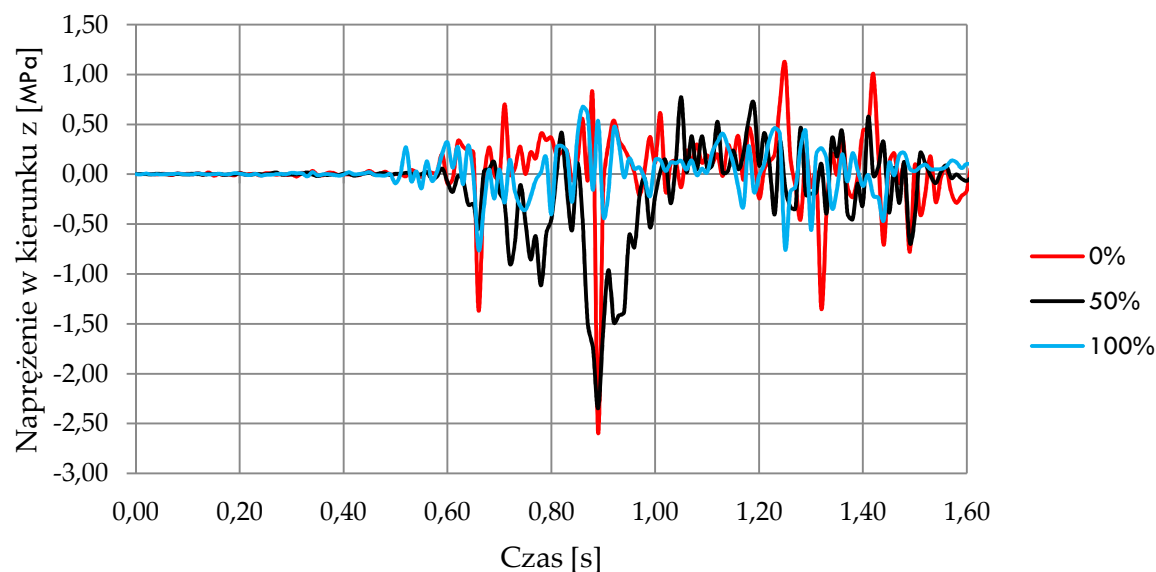
Rys. 2-57. Zmienność w czasie naprężenia σ_z górnego elementu skończonego warstwy SMA w kierunku pionowym dla zmiennego stopnia szepności



Rys. 2-58. Zmienność w czasie naprężenia σ_z dolnego elementu skończonego warstwy SMA w kierunku pionowym dla zmiennego stopnia szepności

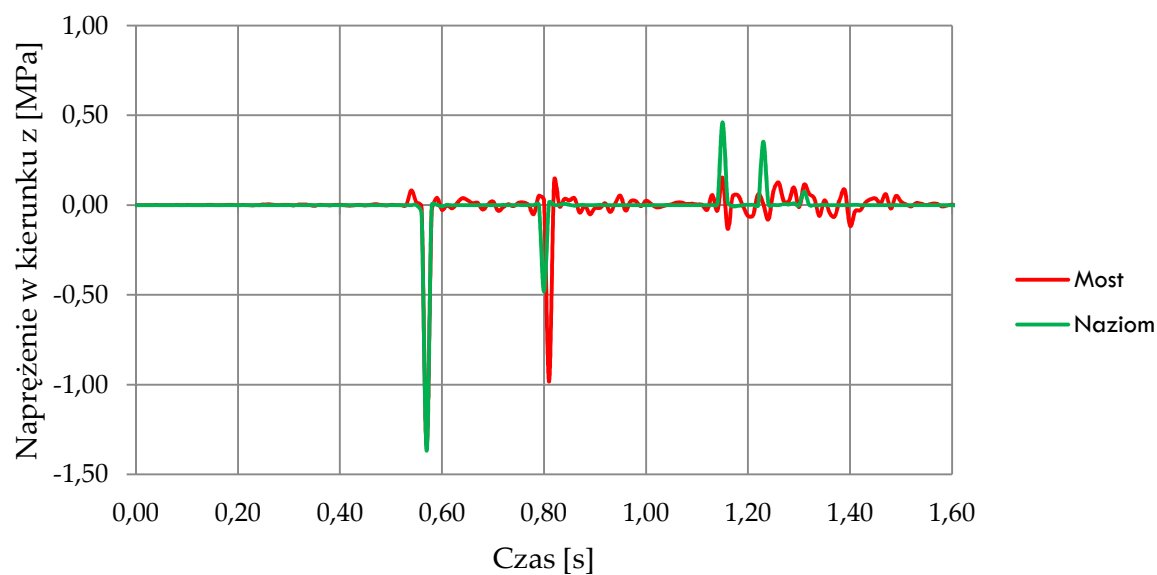


Rys. 2-59. Zmienność w czasie naprężenia σ_z górnego elementu skończonego warstwy MA w kierunku pionowym dla zmiennego stopnia szczepności

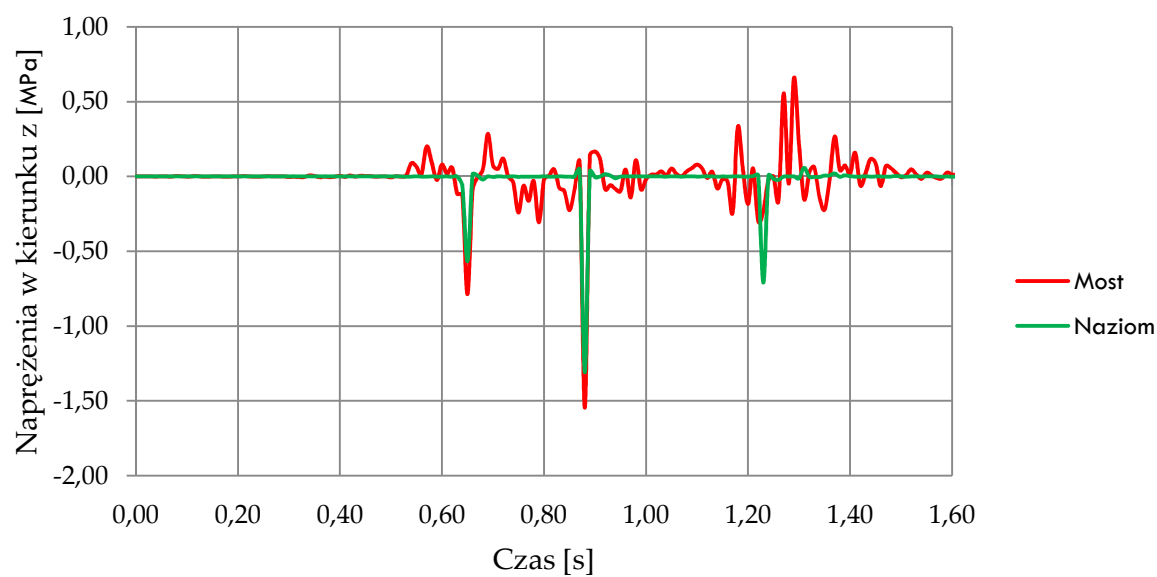


Rys. 2-60. Zmienność w czasie naprężenia σ_z dolnego elementu skończonego warstwy MA w kierunku pionowym dla zmiennego stopnia szczepności

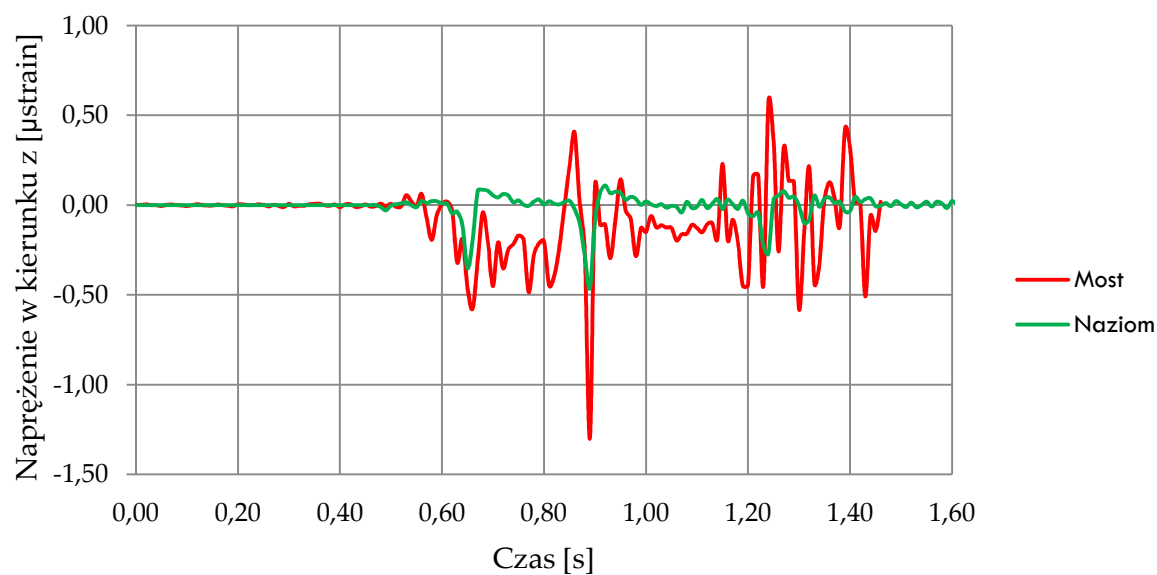
Na rys. 2-61 do rys. 2-64 przedstawiono naprężenia pionowe oznaczone jako σ_z odpowiednio w górnych i dolnych elementach obu warstw asfaltowych. Przedstawiono wyniki dla nawierzchni znajdującej się na obiekcie mostowym (przypadek z 100% szczepnością) oraz nawierzchni o takim samym układzie warstw asfaltowych znajdującej się na naziemiu.



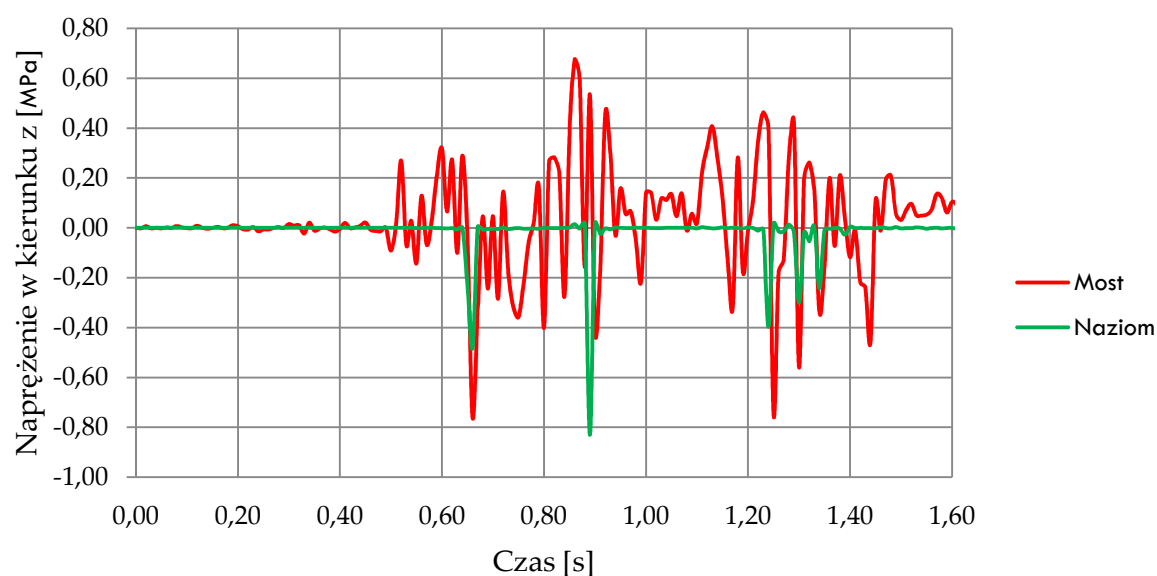
Rys. 2-61. Zmienność w czasie naprężenia σ_z górnego elementu warstwy SMA w kierunku pionowym dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziemiu



Rys. 2-62. Zmienność w czasie naprężenia σ_z dolnego elementu warstwy SMA w kierunku pionowym dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziemiu



Rys. 2-63. Zmienność w czasie naprężenia σ_z górnego elementu warstwy MA w kierunku pionowym dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziemiu



Rys. 2-64. Zmienność w czasie naprężenia σ_z dolnego elementu warstwy MA w kierunku pionowym dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziemiu

W tabl. 2-12 zestawiono wartości ekstremalne naprężeń na górze oraz dole obu warstw asfaltowych. Uwzględniono trzy przypadki szczepności nawierzchni asfaltowej z płytą betonowego mostu (0%, 50% i 100%).

Tablica 2-12 . Wartości ekstremalne naprężeń w warstwach asfaltowych ułożonych na moście

			Szczepność 0%	Szczepność 50%	Szczepność 100%
Naprężenie σ_z w kierunku z [MPa]	SMA - góra	MAX	0,15	0,14	0,15
		MIN	-1,75	-1,43	-1,34
	SMA - dół	MAX	0,38	0,62	0,66
		MIN	-2,65	-1,72	-1,55
	AL - góra	MAX	0,69	0,46	0,57
		MIN	-3,22	-1,64	-1,3
	AL- dół	MAX	1,11	0,77	0,66
		MIN	-2,59	-2,35	-7,61

Wyniki przedstawione w tabl. 2-12 wskazują, że wpływ szczepności między warstwami konstrukcyjnymi nawierzchni mostowej na wartości naprężeń pionowych nie są tak istotne, jak w przypadku naprężeń poziomych.

W tabl. 2-13 przedstawiono porównanie maksymalnych wartości naprężeń uzyskanych na naziemiu i moście (w porównaniu wykorzystano model MES mostu z 100% szczepnością nawierzchni z konstrukcją mostu).

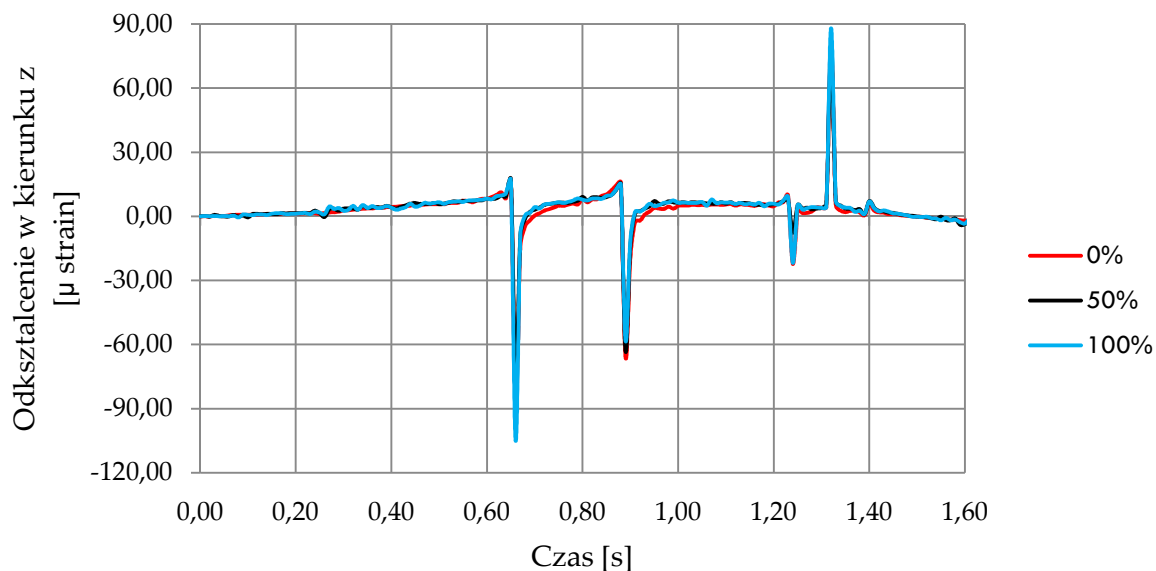
Tablica 2-13. Zestawienie ekstremalne naprężeń uzyskanych na naziemiu i moście

			Wyniki z naziemu	Wyniki z mostu	Różnica względna [%]
Naprężenie σ_z w kierunku z [MPa]	SMA - góra	MAX	0,46	0,15	66,8
		MIN	-1,37	-1,34	1,9
	SMA - dół	MAX	0,58	0,66	-14,2
		MIN	-1,31	-1,55	-18,3
	AL - góra	MAX	0,11	0,57	-420
		MIN	-0,46	-1,3	-180,8
	AL- dół	MAX	0,18	0,68	-266,9
		MIN	-0,83	-0,76	8,3

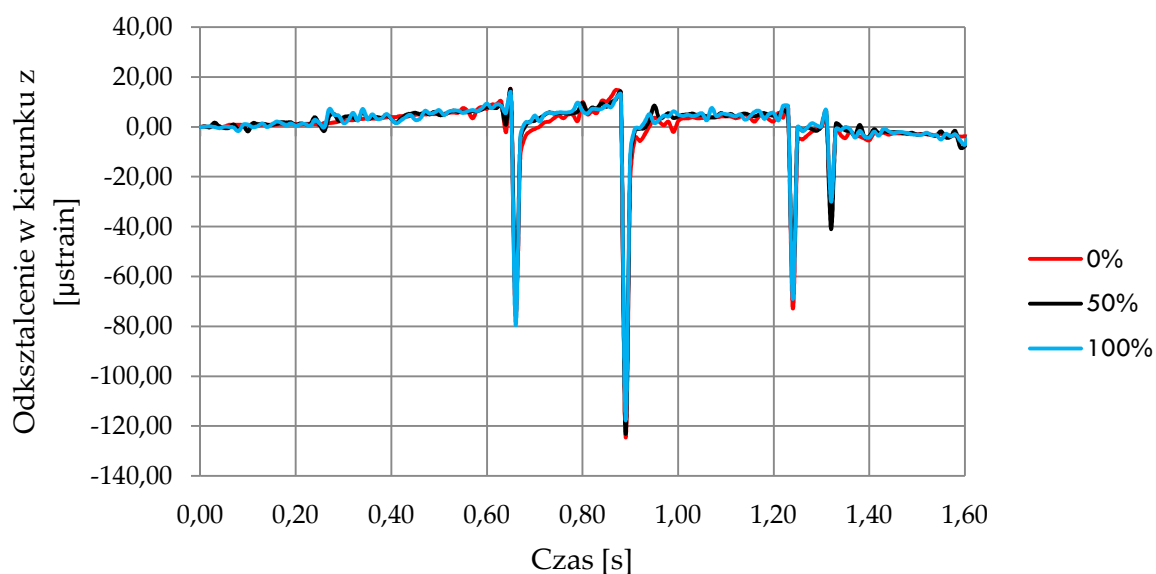
Z tabl. 2-13 wynika, że naprężenia σ_z w warstwach konstrukcyjnych nawierzchni mostowej są wyższe niż w takich samych warstwach nawierzchni na naziemiu.

Odształcenia pionowe ε_z

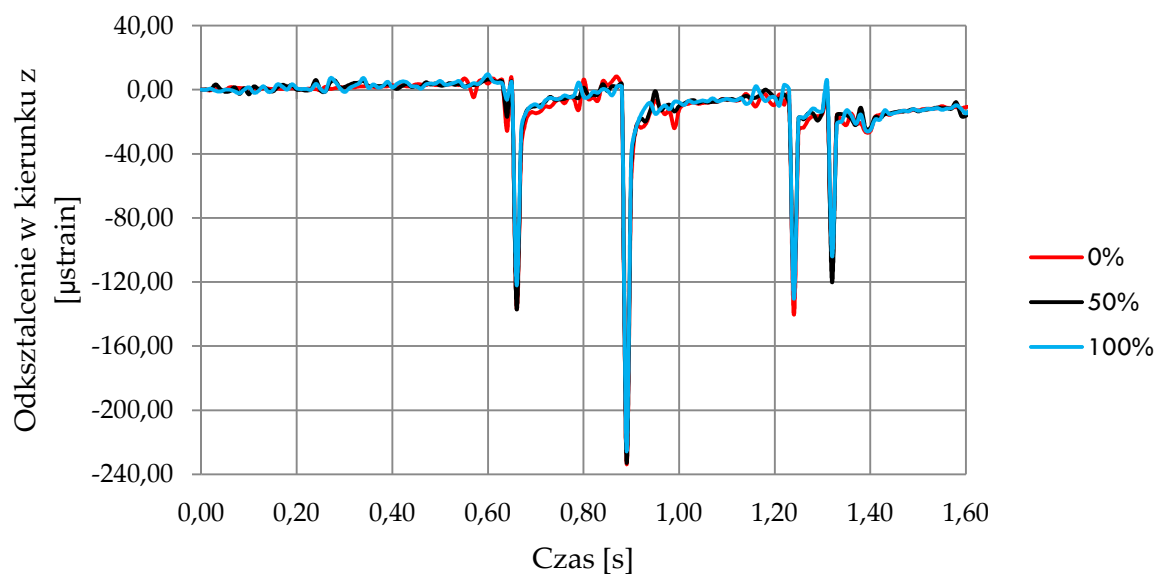
Na rys. 2-65 do rys. 2-68 przedstawiono odkształcenia pionowe oznaczone jako ε_z odpowiednio w górnych i dolnych elementach skończonych obu warstw asfaltowych. Przedstawiono wyniki dla różnego stopnia szczepności warstwa nawierzchni asfaltowych do konstrukcji mostu.



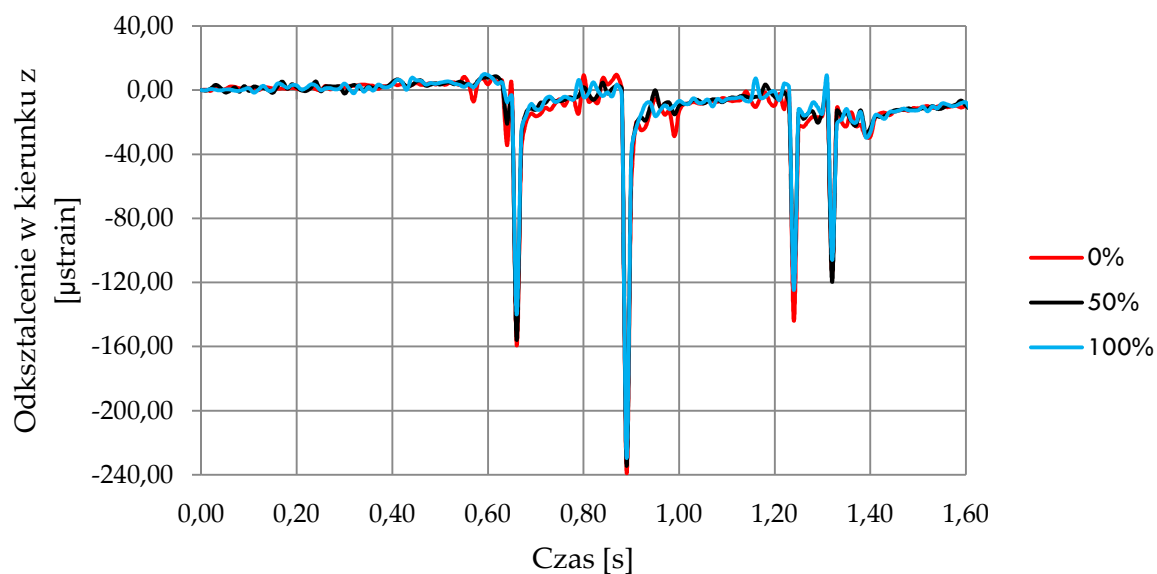
Rys. 2-65. Zmienność w czasie odkształcenia ε_z górnego elementu skończonego warstwy SMA w kierunku pionowym dla zmiennego stopnia szczepności



Rys. 2-66. Zmienność w czasie odkształcenia ε_z dolnego elementu skończonego warstwy SMA w kierunku pionowym dla zmiennego stopnia szczepności

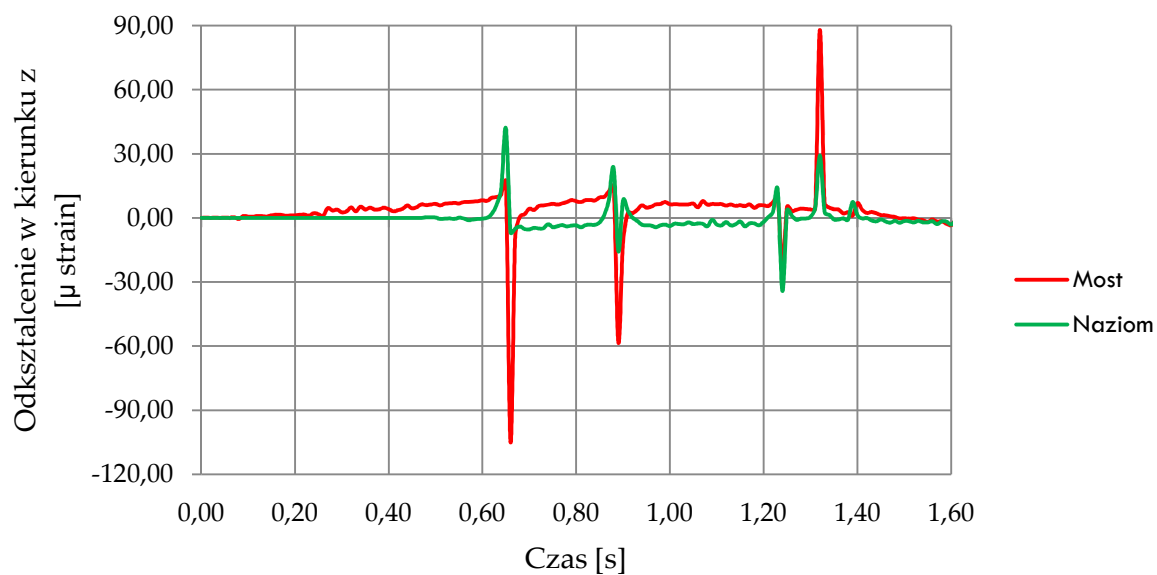


Rys. 2-67. Zmienność w czasie odkształcenia ε_z górnego elementu skończonego warstwy MA w kierunku pionowym dla zmiennego stopnia szczepności

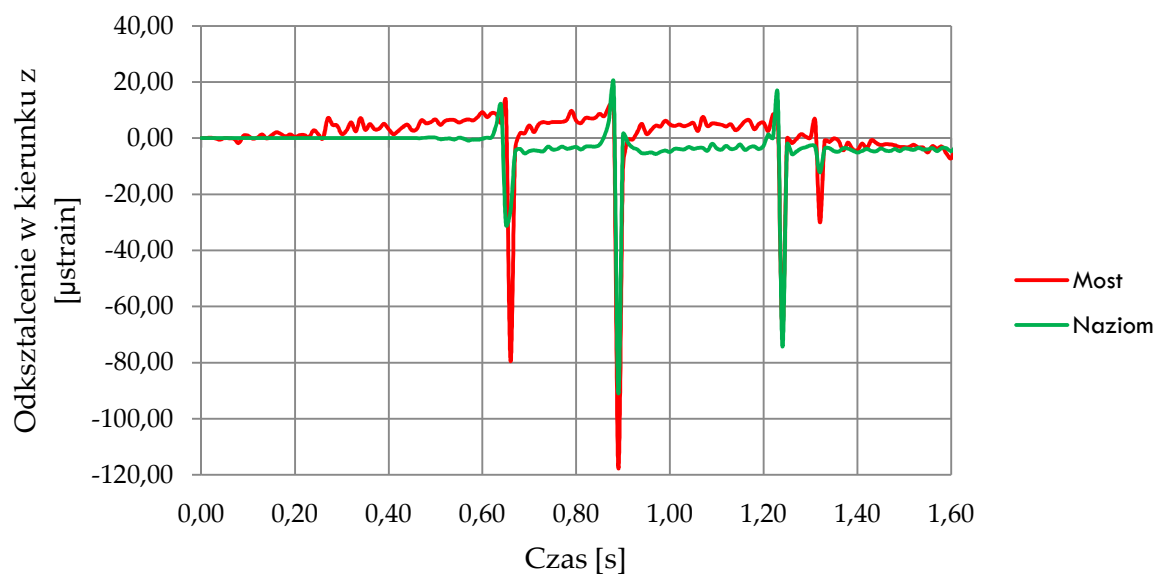


Rys. 2-68. Zmienność w czasie odkształcenia ε_z dolnego elementu skończonego warstwy MA w kierunku pionowym dla zmiennego stopnia szczepności

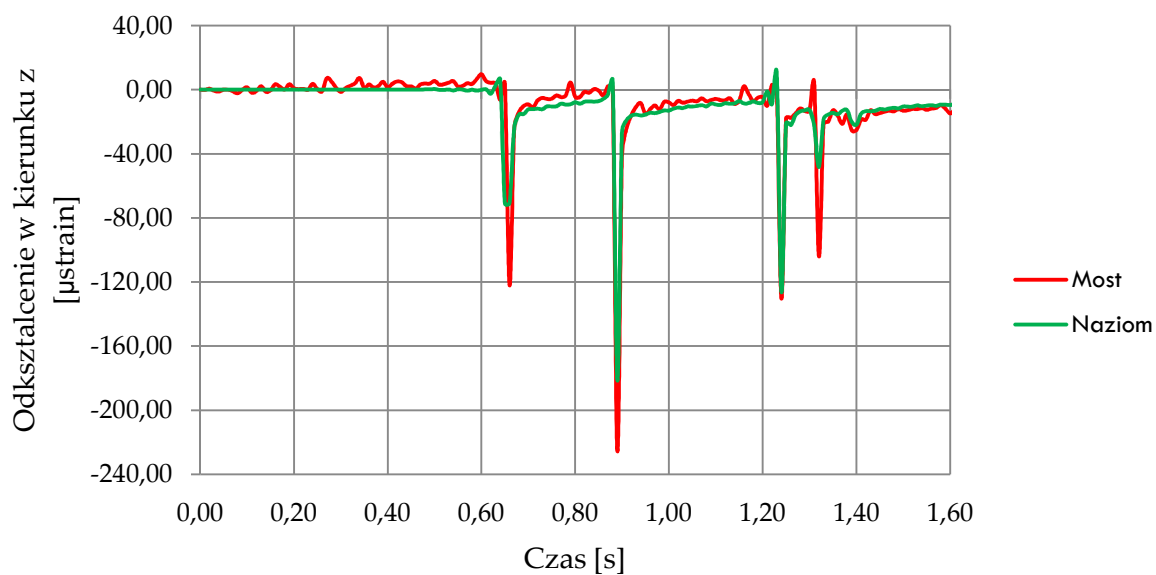
Na rys. 2-69 do rys. 2-72 przedstawiono odkształcenia pionowe oznaczone jako ε_z odpowiednio w górnych i dolnych elementach obu warstw asfaltowych. Przedstawiono wyniki dla nawierzchni znajdującej się na obiekcie mostowym (przypadek z 100% szczepnością) oraz nawierzchni o takim samym układzie warstw asfaltowych znajdującej się na naziemiu.



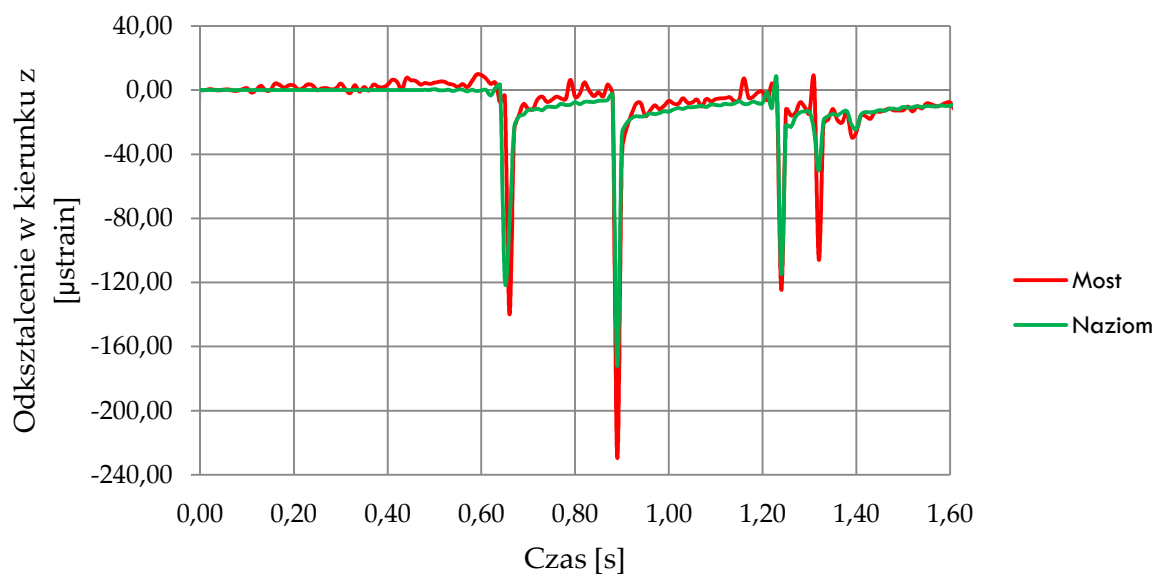
Rys. 2-69. Zmienność w czasie odkształcenia ϵ_z górnego elementu skończonego warstwy SMA w kierunku pionowym dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziemie



Rys. 2-70. Zmienność w czasie odkształcenia ϵ_z dolnego elementu skończonego warstwy SMA w kierunku pionowym dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziemie



Rys. 2-71. Zmienność w czasie odkształcenia ε_z górnego elementu skończonego warstwy MA w kierunku pionowym dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziemiu



Rys. 2-72. Zmienność w czasie odkształcenia ε_z dolnego elementu skończonego warstwy MA w kierunku pionowym dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziemiu

W tabl. 2-14 zestawiono wartości ekstremalne odkształceń na górze oraz dole obu warstw asfaltowych. Uwzględniono trzy przypadki szczepności nawierzchni asfaltowej z płytą betonowego mostu (0%, 50% i 100%).

Tablica 2-14. Wartości ekstremalne odkształceń w warstwach asfaltowych

			Szczepność 0%	Szczepność 50%	Szczepność 100%
Odształcenie ε_z w kierunku z [μstrain]	SMA - góra	MAX	79,9	76	87,9
		MIN	-87,3	-74,7	-105
	SMA - dół	MAX	14,8	13,9	13,2
		MIN	-124	-123	-118
	AL - góra	MAX	8,16	6,42	9,65
		MIN	-233	-233	-225
	AL- dół	MAX	9,37	8,29	9,69
		MIN	-239	-234	-229

W tabl. 2-15 przedstawiono porównanie maksymalnych wartości odkształceń uzyskanych na naziomie i moście (w porównaniu wykorzystano model MES mostu z 100% szczepnością nawierzchni z konstrukcją mostu).

Tablica 2-15. Zestawienie ekstremalne odkształceń uzyskanych na naziomie i moście

			Wyniki z naziomu	Wyniki z mostu	Różnica względna[%]
Odształcenie ε_z w kierunku z [μstrain]	SMA - góra	MAX	41,9	87,9	-109,7
		MIN	-34,2	-105	-207
	SMA - dół	MAX	19,3	13,2	31,6
		MIN	-90,9	-118	-29,8
	AL - góra	MAX	10,5	9,65	8,1
		MIN	-181	-225	-24,3
	AL- dół	MAX	6,82	9,69	-42,1
		MIN	-172	-229	-33,1

W podsumowaniu wyników odkształceń pionowych przedstawionych na rys. 2-69 do 2-72 i w tabl. 2-15 należy stwierdzić, że wartości odkształceń w warstwach nawierzchniowych na obiekcie mostowym przyjmują wartości niekorzystne, większe niż odkształcenia pionowe warstw nawierzchniowych na naziomie.

Z przedstawionych wyników można wywnioskować, że stopień szczepności ma znaczący wpływ na wartości odkształceń w nawierzchni mostowej, przez co może wpływać na jej trwałość. Różnica w wynikach jest niewielka z powodu metody dobrania parametrów szczepności. Dysponując jedynie wartościami w zakresie sprężystym dobrano parametry dla najwyższych występujących prędkości odkształceń. Istnieje również możliwość dodania własnego modelu materiału opisującego czepność warstw nawierzchni z konstrukcją mostu, natomiast zaprezentowane opracowanie otwiera drogę do dalszych szczegółowych badań. Różnice w historii odkształceń pomiędzy modelem nawierzchni na obiekcie mostowym, a modelem na naziomie są znaczne, natomiast maksymalne wartości odkształceń i naprężeń są zbliżone.

3 CHARAKTERYSTYKA PODSTAWOWYCH RODZAJÓW ZNISZCZEŃ IZOLACJI I NAWIERZCHNI MOSTOWEJ ORAZ ANALIZA PRZYCZYN ICH POWSTAWANIA

3.1 Charakterystyka szczególnych warunków pracy izolacji i nawierzchni mostowej w aspekcie możliwości powstawania zniszczeń

Nawierzchnie mostowe w wyniku działania obciążenia ruchem oraz oddziaływania czynników klimatycznych ulegają następującym zniszczeniom:

- spękania podłużne, poprzeczne, siatkowe powstałe w wyniku skurczu termicznego lub powtarzalnych obciążeń,
- koleiny wzdłuż śladów kół powstałe w wyniku odkształcenia lepko-plastycznego asfaltowych warstw nawierzchni,
- sfałowania w postaci przemiennych zagłębień i wzniesień nawierzchni powstałe w wyniku przemieszczania materiału warstw nawierzchni podczas zmiany prędkości ruchu,
- odciski w formie zagłębień punktowych, powstałe w wyniku miejscowego przeciążenia,
- pęknięcie połączenia powstałe w wyniku odspojenia się warstwy lub warstw nawierzchni lub od elementów wyposażenia,
- ubytek, w postaci wykruszenia mieszanki mineralno-asfaltowej na głębokość nie większą niż grubość warstwy ścieralnej, powstały w wyniku niewłaściwego składu mieszanki mineralno-asfaltowej lub złego zagęszczenia,
- wybój, w postaci wykruszenia mieszanki mineralno-asfaltowej na głębokość większą niż grubość warstwy ścieralnej, powstały w wyniku niewłaściwie i w nie odpowiednim czasie przeprowadzonego remontu cząstkowego,
- pęcherze w postaci miejscowych wypukłości powstałe na skutek oderwania się warstwy lub warstw nawierzchni lub izolacji od podłoża pod wpływem ciśnienia pary wodnej lub par innych cieczy,
- wypływ lepiscza, w postaci plamy na nawierzchni, powstały w wyniku miejscowego nadmiaru lepiscza w mieszance mineralno-asfaltowej.

Zniszczenia powstałe w warstwach nawierzchni mostowej mogą powodować uszkodzenie hydroizolacji w postaci utraty częściowej lub całkowitej przyczepności do podłoża, utraty szczepności między izolacją a warstwą ochronną, wzrostu nasiąkliwości izolacji powyżej 5%, uszkodzeń izolacji w wyniku pęknięcia, przebicia, utraty szczelności.

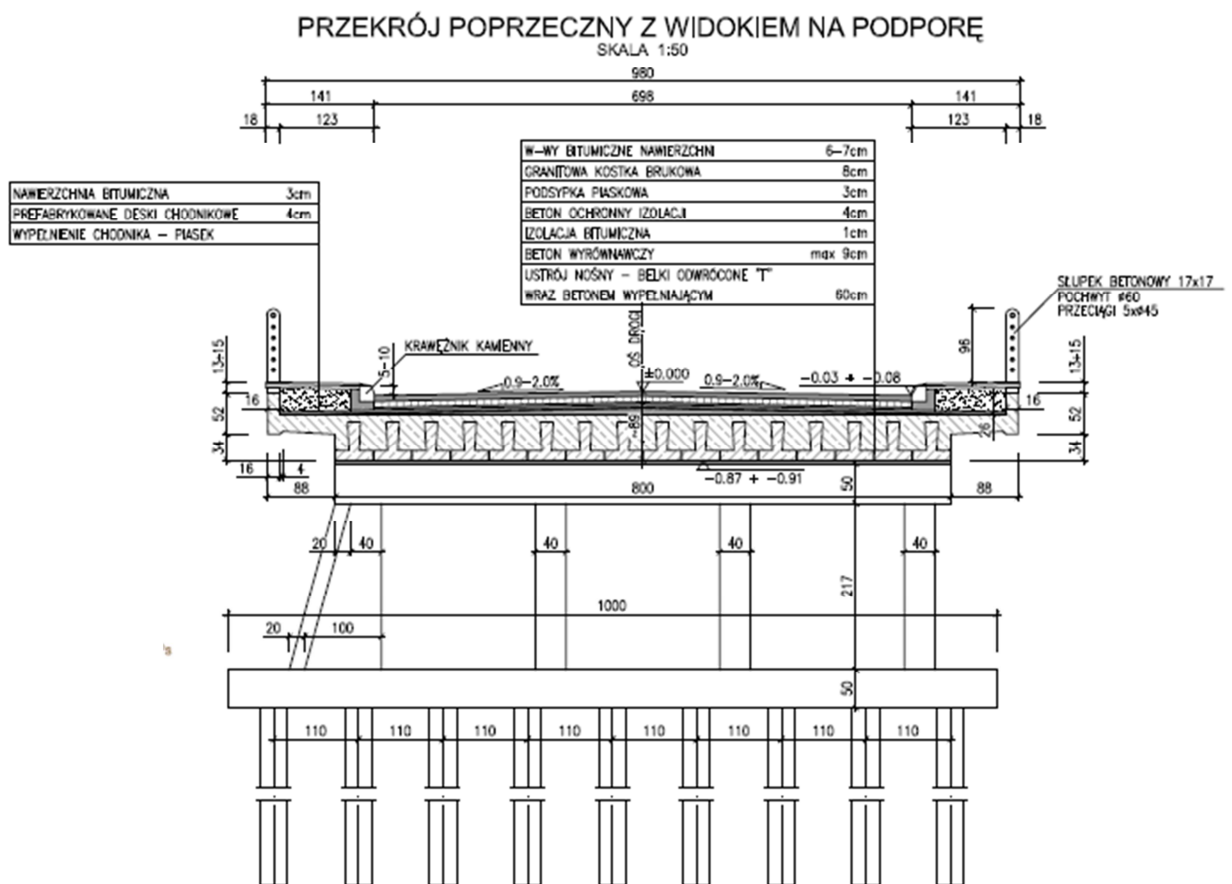
Wykonywanie izolacji i warstw ochronnych wymaga stosowania wysokich temperatur rzędu 220-250°C. Tak wysoka temperatura nie jest groźna dla samego betonu ale rozprężanie gazów zamkniętych w porach wierzchniej warstwy betonów może powodować powstawanie pęcherzy w warstwie izolacji i na jej powierzchni.

3.2 Analiza zniszczeń nawierzchni na przykładzie wybranych obiektów mostowych

3.2.1 Most w Sztabinie na drodze krajowej nr 8

Nawierzchnie mostowe w wyniku działania obciążenia ruchem oraz oddziaływania czynników klimatycznych ulegają. Obiekt mostowy znajduje się nad rzeką Biebrzą. Obiekt jest w złym stanie technicznym i konieczna jest jego naprawa.

Na rys. 3-1 przedstawiono układ istniejących warstw konstrukcyjnych nawierzchni, chodników oraz przekrój konstrukcji obiektu mostowego. Początkowo nawierzchnia na obiekcie mostowym była wykonana z kostki granitowej na podsypce piaskowej, warstwy ochronnej izolacji z betonu cementowego oraz papy smołowej, która stanowiła izolację pomostu betonowego. W późniejszym okresie nawierzchnia z kostki została przykryta warstwami z mieszanki mineralno-asfaltowej grubości 6-7 cm.



Rys. 3-1. Przekrój poprzeczny konstrukcji mostu w Sztabinie [33]

Konstrukcję nawierzchni chodnika stanowi nawierzchnia asfaltowa grubości 3 cm położona na płytach betonowych grubości 4 cm. Wypełnienie wolnej przestrzeni pod płytami betonowymi wykonane zostało z piasku.

Istniejący stan nawierzchni jezdni i chodnika na moście w Sztabinie przedstawiono na rys. 3-2 i rys. 3-3.



Rys.3-2. Nawierzchnia jezdni na moście w Sztabinie



Rys. 3-3. Nawierzchnia chodnika na moście w Sztabinie

Zły stan izolacji z papy spowodował przesiąkanie wody do konstrukcji płyty obiektu. Powstały zniszczenia w postaci brunatnych zacieków, wykwitów i wykruszeń betonu (rys. 3-4).



Rys. 3-4. Przykłady zniszczeń dolnej powierzchni płyty betonowej mostu na Biebrzy

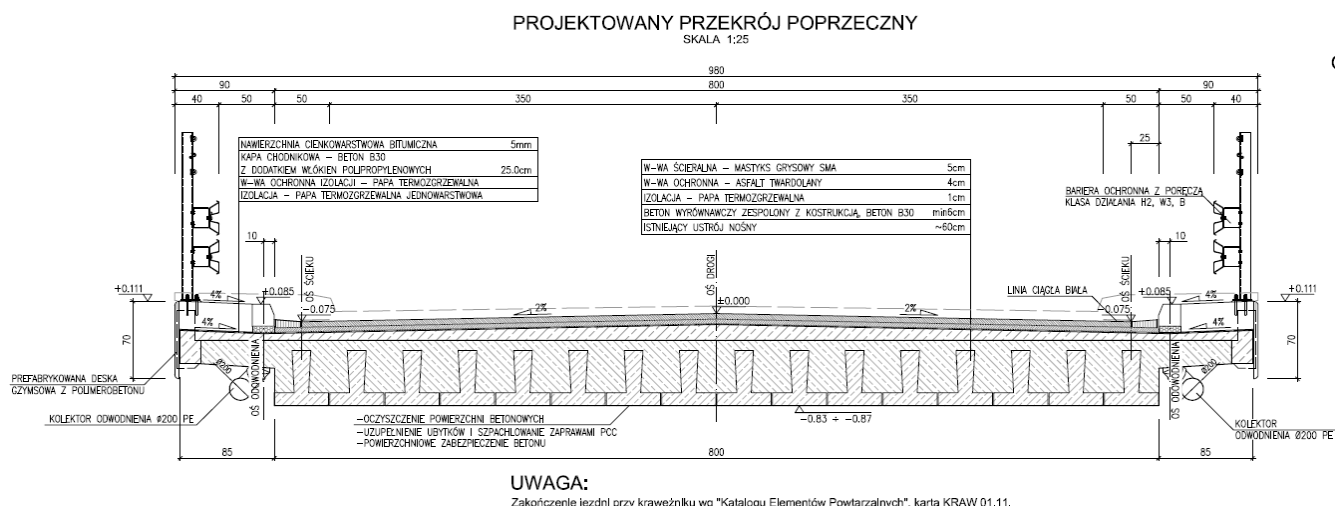
Na zniszczenia nawierzchni w dużym stopniu wpłynął niewłaściwy układ warstw konstrukcyjnych nawierzchni na obiekcie mostowym w skład którego wchodziła kostka granitowa na podsypce piaskowej przykryta warstwą asfaltową (rys. 3-5).



Rys. 3-5. Odkrywanie istniejącej konstrukcji nawierzchni warstw: kostki granitowej, posypki piaskowej, betonu ochronnego i izolacji z papy smołowej

Odkrywanie wykazało całkowitą degradację warstwy izolacji oraz warstw nawierzchni pod kostką granitową.

W 2012 roku przeprowadzono remont konstrukcji nośnej mostu oraz przebudowę konstrukcji nawierzchni wraz z wymianą zabezpieczeń hydroizolacyjnych. Przekrój poprzeczny projektowanej konstrukcji na moście w Sztabinie przedstawiono na rys. 3-6.



Rys. 3-6. Projektowana konstrukcja nawierzchni mostu w Sztabinie [33]

Zaprojektowany układ warstw konstrukcji nawierzchni na moście w Sztabinie należy uznać za typowe rozwiązanie pod względem konstrukcji oraz zastosowanych materiałów. Zastosowana jako izolacja pomostu betonowego papa termozgrzewalna należy do najczęściej stosowanych obecnie materiałów do izolacji mostów. Warstwa ochronna z asfaltu lanego i warstwa ścieralna z grys asphaltowego SMA, prawidłowo zaprojektowane i wykonane, powinny zabezpieczyć most przed niszczącym działaniem wody i stworzyć bezpieczne warunki dla ruchu samochodowego.

3.2.2 Kładka nad Kanałem Augustowskim w Augustowie na drodze krajowej nr 8

Dobrym przykładem zastosowania izolacionawierzchni jest rozwiązanie przyjęte na kładce stalowej nad Kanałem Augustowskim jako nawierzchni chodnika i ścieżki rowerowej. Nawierzchnia została wykonana w technologii izolacionawierzchni z zastosowaniem żywicy epoksydowej (rys. 3-7).

Innym przykładem cienkiej nawierzchni na obiekcie mostowym z pomostem betonowym jest nawierzchnia powłokowa asphaltowo-polimerowa wykonana na chodniku po przeciwnej stronie kładki (rys. 3-8). Powierzchnia chodnika pod względem równości – bez zastrzeżeń, niejednorodna kolorystyka, widoczne połączenie technologiczne, podłużne.



Rys. 3-7. Izolacja nawierzchnia poliuretanowa - widok ogólny powierzchni chodnika, prawidłowo wykonane połączenie nawierzchni z krawężnikiem



Rys. 3-8. Izolacja nawierzchnia poliuretanowo-asfaltowa

Stan nawierzchni na obu ciągach pieszych kładki i chodnika na moście należy uznać za bardzo dobry pod względem równości, szorstkości oraz szczelności. Nawierzchnia jest jednorodna bez zniszczeń powierzchniowych po ośmiu latach eksploatacji.

3.2.3 Most gen. Stefana Grota-Roweckiego

Most Grota-Roweckiego, wybudowany w 1981 roku, jest jednym z większych mostów Warszawy. Most Grota-Roweckiego składa się z dwóch bliźniaczych konstrukcji o szerokości 2x18.5 m. Są to niezależne obiekty 7- przęsłowe o łącznej długości 645 m każdy. Każdy z mostów prowadzi trzy pasy ruchu 3x3.5 m oraz pas włączenia i wyłączenia. Szerokość jezdni w krawężnikach wynosi 14.5 m, w świetle stalowych barier 15.5 m. Ze względu na charakter trasy szybkiego ruchu chodniki na zewnętrznych wspornikach spełniają rolę chodników ewakuacyjnych oraz dla obsługi technicznej mostu, nie są przeznaczone dla ruchu pieszego i rowerowego.

Pomost mostu Grota Roweckiego jest ortotropowy i składa się z blachy jezdni o zmiennej grubości od 12 do 28mm, żeber podłużnych i poprzecznych. Grubość blachy płyty chodnikowej wynosi 12mm, zaś w okolicach dylatacji zwiększa się do 14mm.

Istniejąca nawierzchnia składa się z dwuwarstwowej nawierzchni asfaltowej ułożonej na izolacji z mastyksu. Sumaryczna grubość obu warstw jest zmienna i wynosi dla mostu północnego średnio 128 mm, dla mostu południowego 134 mm. W warstwie asfaltowej znajduje się siatka z prętów o średnicy Ø8 mm przyspawana punktowo do stalowej płyty pomostu o grubości 12 mm [34] .

Ocena stanu nawierzchni mostu

Wizualną ocenę stanu nawierzchni przeprowadzono w październiku 2012 roku. Porównując stan nawierzchni jezdni południowej (kierunek Żoliborz – Praga) ze stanem nawierzchni jezdni północnej należy stwierdzić, że znacząco mniej zniszczeń występuje na nawierzchni jezdni północnej.

Na nawierzchni jezdni południowej występują następujące zniszczenia:

- spękania siatkowe w obrębie dylatacji (rys. 3-9),
- koleiny i fałdy przykrawędziowe ze spękaniem siatkowym (rys. 3-10),
- spękania poprzeczne (rys. 3-11),
- spękanie podłużne (rys. 3-12),
- łata ze spękaniem oraz spękania siatkowe w obrębie kratki ściekowej (rys. 3-13).



Rys. 3-9. Spękania siatkowe w obrębie dylatacji



Rys. 3-10. Koleiny i fałdy przykrawędziowe ze spękaniami siatkowymi



Rys. 3-11. Spękania poprzeczne



Rys. 3-12. Spękanie podłużne



Rys. 3-13. Łata ze spękaniami oraz spękania siatkowe w obrębie kratki ściekowej

Na nawierzchni jezdni północnej mostu Grota występują następujące zniszczenia:

- spękanie poprzeczne (rys. 3-14),
- spękania siatkowe w prawym śladzie koła (rys. 3-15),
- spękanie podłużne z ubytkiem mieszanki mineralno-asfaltowej (rys. 3-16),
- spękania, ubytki mieszanki mineralno-asfaltowej oraz źle wykonana łata w obrębie dylatacji (rys. 3-17).



Rys. 3-14. Spękanie poprzeczne



Rys. 3-15. Spękania siatkowe w prawym śladzie koła



Rys. 3-16. Spękanie podłużne z ubytkiem mieszanki mineralno-asfaltowej



Rys. 3-17. Spękania, ubytki mieszanki mineralno-asfaltowej oraz źle wykonana łąta w obrębie dylatacji

Oceniając jako zły stan nawierzchni jezdni południowej mostu, na którym występuje duża ilość różnych zniszczeń, należy stwierdzić, że dominującym zniszczeniem są odkształcenia trwałe w postaci kolein i fałd wraz z licznymi spękaniem siatkowymi. Przyczyną tych zniszczeń najprawdopodobniej jest częściowa utrata wiązań międzywarstwowych w połączeniu z podłożem, izolacją i warstwami nawierzchni, przy występującym bardzo dużym obciążeniu ciężkich pojazdów samochodowych.

4 OCENA WPŁYWU ODDZIAŁYWANIA TEMPERATURY TECHNOLOGICZNEJ NA TRWAŁOŚĆ MATERIAŁÓW STOSOWANYCH DO WARSTW IZOLACJI I WARSTW NAWIERZCHNI

Lepiszczą asfaltowe jako materiały termoplastyczne w warstwach nawierzchniowych i izolacyjnych zmieniają swoje właściwości w zależności od temperatury środowiska i warunków obciążenia. Asfaltowa nawierzchnia mostowa, ze względu na małą grubość jest, w większym stopniu niż nawierzchnia drogowa, narażona na oddziaływanie zmiennych temperatur otoczenia. W warunkach klimatycznych panujących w Polsce i Europie środkowej korzystne jest aby temperaturowy zakres lepkości lepkości lepkości był na tyle szeroki, by w ekstremalnych temperaturach osiągniętych w czasie eksploatacji obiektu, w którym asfalt został zastosowany nie zmieniał on swojego stanu reologicznego. Stosowane do nawierzchni i izolacji asfaltowe materiały powinny posiadać właściwości takie, by nie pękały w niskich temperaturach w okresie zimowym i nie przechodziły w stan plastyczny w okresie letnim. Właściwości lepkości lepkości lepkości asfaltowych spełniających wymagania szerokiego temperaturowego zakresu lepkości lepkości lepkości możemy uzyskać modyfikując asfalty drogowe dodatkami tworzyw sztucznych, przede wszystkim polimerami.

W celu poprawy cech technicznych lepkości lepkości lepkości asfaltowych stosujemy modyfikację dodatkiem polimerów. Najczęściej stosowane są polimery typu elastomer w postaci kopolimeru styren-butadien-styren SBS. Dodatek tego elastomeru skutecznie poprawia właściwości asfaltu modyfikowanego, zwiększając korzystnie odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na odkształcenia trwałe, spękania zmęczeniowe i spękania niskotemperaturowe.

Realizacja zadania 4 dotyczy badania lepkości lepkości lepkości, pap termozgrzewalnych oraz mieszanek mineralno-asfaltowych, w aspekcie ich odporności na wysokie temperatury technologicznej. W dalszej części etapu prac badawczych (zadanie 5) dokonano oceny wpływu oddziaływania wody i środków odladzających, starzenia materiałów i obciążeń ruchem pojazdów na właściwości funkcjonalne izolacji i nawierzchni w zakresie temperatury eksploatacyjnej.

4.1 Badanie asfaltu i asfaltu modyfikowanego stosowanego do izolacji i nawierzchni mostowej przed i po oddziaływaniu wysokiej temperatury technologicznej wytwarzania i układania mieszanki mineralno-asfaltowej

4.1.1 Wymagania i klasyfikacja lepiszczy asfaltowych wg europejskich wymagań (EN) z uwzględnieniem szczególnych warunków krajowych

Wymagania dla asfaltów drogowych o penetracji od $20 \cdot 0,1$ mm do $220 \cdot 0,1$ mm określa norma PN-EN 12591:2010 [N2] (tabl. 4-1A i tabl. 4-1B), w której są podane podstawowe klasyfikacyjne wymagania dla asfaltów drogowych. Wymagania te są jednak niewystarczające do pełnej oceny asfaltu w szerokim zakresie temperatur użytkowych, która wynosi około 260°C (minimalna temperatura eksploatacji: około -40°C , maksymalna temperatura produkcji asfaltu lanego: około 220°C). W celu przeprowadzenia oceny właściwości asfaltu w szerokim zakresie temperatur użytkowych należy, poza badaniami podstawowymi, określić właściwości reologiczne pozwalające na określenie właściwości lepkosprężystych, adhezję (przyczepność, powinowactwo) asfaltu do kruszywa i w większym zakresie odporność na starzenie będącą miarą trwałości nawierzchni asfaltowych.

Tablica 4-1A. Wymagania ogólne dotyczące asfaltów drogowych o penetracji od 20 × 0,1 mm do 220 × 0,1 mm, przeznaczonych do stosowania w budownictwie drogowym w Polsce wg normy PN-EN 12591:2010

Właściwość	Metoda badania	Jednostka	Rodzaj asfaltu drogowego					
			20/30	35/50	50/70	70/100	100/150	160/220
Penetracja w 25 °C	EN 1426 [N4]	0,1 mm	20 – 30	35 – 50	50 – 70	70 – 100	100 – 150	160 – 220
Temperatura mięknięcia	EN 1427 [N5]	°C	55 – 63	50 – 58	46 – 54	43 – 51	39 – 47	35 – 43
Odporność na starzenie w 163 °C	EN 12607-1 [N29]							
Pozostała penetracja		%	≥ 55	≥ 53	≥ 50	≥ 46	≥ 43	≥ 37
Wzrost temperatury mięknięcia		°C	≤ 8	≤ 8	≤ 9	≤ 9	≤ 10	≤ 11
Zmiana masy ^{a)} (wartość bezwzględna)		%	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 1,0
Temperatura zapłonu	EN ISO 2592 [N40]	°C	≥ 240	≥ 240	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 220
Rozpuszczalność	EN 12592 [N41]	% (m/m)	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0
^{a)} Zmiana masy może być wartością dodatnią lub ujemną.								

Tablica 4-1B. Wymagania dotyczące asfaltów drogowych o penetracji od 20 × 0,1 mm do 220 × 0,1 mm, przeznaczonych do stosowania w budownictwie drogowym w Polsce. Właściwości uwzględniające warunki krajowe wg normy PN-EN 12591:2010

Właściwość	Metoda badania	Jednostka	Rodzaj asfaltu drogowego					
			20/30	35/50	50/70	70/100	100/150	160/220
Indeks penetracji	EN 12591 Zał. A [N2]	-	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Lepkość dynamiczna w 60 °C	EN 12596 [N42]	Pa · s	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Temperatura łamliwości wg Fraassa	EN 12593 [N32]	°C	NR	≤ - 5	≤ - 8	≤ - 10	≤ - 12	≤ - 15
Lepkość kinematyczna w 135 °C	EN 12595 [N43]	mm ² /s	NR	NR	NR	NR	NR	NR
NR – (No Requirement) – oznacza brak wymagań.								

Norma PN-EN 14023:2011 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Zasady klasyfikacji asfaltów modyfikowanych polimerami” [N3] jest dokumentem należącym do grupy nowych norm europejskich typu klasyfikacyjnego i wymaga załącznika krajowego.

W normie zrezygnowano z tworzenia rodzajów produktów, tzn. gotowych zestawów wymagań. Wymagania dla właściwości podzielono na 11 klas, które nie są ze sobą powiązane. Norma przewiduje następujące klasy wymagań:

- klasa „0” NR (No Requirement) – brak wymagań, można zastosować w sytuacji, gdy dla danej właściwości brak jest wymagań krajowych w miejscu zamierzonego stosowania,
- klasa „1” TBR (To Be Reported) – do zadeklarowania, można zastosować w sytuacji, gdy dla danej właściwości brak jest wymagań krajowych w miejscu zamierzonego stosowania, jednak dana właściwość została uznana jako użyteczna do opisu asfaltów modyfikowanych polimerami
- klasy od 2 do 10 – są klasami z konkretnymi wymaganiami liczbowymi.

W tabl. 4-2 przedstawiono wymagania dla asfaltów modyfikowanych polimerami (PMB) przeznaczonych do stosowania w budownictwie drogowym w Polsce wg PN-EN 14023:2011.

Tablica 4-2. Wymagania dotyczące asfaltów modyfikowanych polimerami (PMB) przeznaczonych do stosowania w Polsce w budownictwie drogowym wg PN-EN 14023:2011

Właściwość		Metoda badania	Jednostka	Gatunki asfaltów modyfikowanego polimerami (PMB)													
				PMB 10/40-65		PMB 25/55-60		PMB 45/80-55		PMB 45/80-65		PMB 65/105-60		PMB 90/150-45		PMB 120/200-40	
				Wyma- ganie	klasa	Wyma- ganie	klasa	Wyma- ganie	klasa	Wyma- ganie	klasa	Wyma- ganie	klasa	Wyma- ganie	klasa	Wyma- ganie	klasa
Penetracja w 25°C		EN 1426 [N4]	0,1 mm	10-40	2	25-55	3	45-80	4	45-80	4	65-105	6	90-150	8	120-200	9
Temperatura mięknięcia		EN 1427 [N5]	°C	≥ 65	5	≥ 60	6	≥ 55	7	≥ 65	5	≥ 60	6	≥ 45	9	≥ 40	10
Kohezja	Siła rozciągania metodą z duktylometrem, (rozciąganie 50mm/min)	EN 13589 [N35] EN 13703 [N36]	J/cm2	≥ 2 w 10°C	6	≥ 2 w 10°C	6	≥ 3 w 5°C	2	≥ 3 w 5°C	2	≥ 3 w 5°C	2	≥ 1 w 5°C	4	≥ 1 w 5°C	4
Odporność na starzenie	Zmiana masy	EN 12607-1 [N29]	% m/m	≤ 0,5	3	≤ 0,5	3	≤ 0,5	3	≤ 0,5	3	≤ 0,5	3	≤ 0,5	3	≤ 0,5	3
	Pozostała penetracja w 25°C	EN 12607-1 EN 1426	%	≥ 60	7	≥ 60	7	≥ 60	7	≥ 60	7	≥ 60	7	≥ 50	5	≥ 50	5
	Wzrost temperatury mięknięcia	EN 12607-1 EN 1427	°C	≤ 8	2	≤ 8	2	≤ 8	2	≤ 8	2	≤ 10	3	≤ 10	3	≤ 10	3
Temperatura zapłonu		EN ISO 2592 [N40]	°C	≥ 235	3	≥ 235	3	≥ 235	3	≥ 235	3	≥ 235	3	≥ 235	3	≥ 220	4
Temperatura łamliwości		EN 12593 [N32]	°C	≤ -5	3	≤ -10	5	≤ -12	6	≤ -15	7	≤ -15	7	≤ -18	8	≤ -20	9
Nawrót sprężysty	w 25°C	EN 13398 [N37]	%	≥ 50	5	≥ 50	5	≥ 50	5	≥ 50	5	≥ 50	5	≥ 50	5	≥ 50	5
	w 10°C	EN 13398	%	NR	0	NR	0	NR	0	NR	0	NR	0	NR	0	NR	0
Zakres Plastyczności		Podpunkt 5.2.8.4	°C	TBR ^b	1	TBR ^b	1	TBR ^b	1	TBR ^b	1	TBR ^b	1	TBR ^b	1	TBR ^b	1
Spadek temp. mięknięcia po badaniu wg EN 12607-1		PN-EN 1427	°C	TBR ^b	1	TBR ^b	1	TBR ^b	1	TBR ^b	1	TBR ^b	1	TBR ^b	1	TBR ^b	1
Nawrót sprężysty w 25°C mięknięcia po badaniu wg EN 12607-1		EN 13398	%	≥ 50	4	≥ 50	4	≥ 50	4	≥ 60	3	≥ 60	3	≥ 50	4	≥ 50	4
Nawrót sprężysty w 10°C po badaniu wg EN 12607-1		EN 13398	%	NR ^a	0	NR ^a	0	NR ^a	0	NR ^a	0	NR ^a	0	NR ^a	0	NR ^a	0
Stabilność magazynowania Różnica temperatur mięknięcia		EN 13399 EN 1427	°C	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 5	2
Stabilność magazynowania Różnica penetracji		EN 13399 EN 1426	0,1 mm	NR ^a	0	NR ^a	0	NR ^a	0	NR ^a	0	NR ^a	0	NR ^a	0	NR ^a	0

^{a)} NR – No Requirement (brak wymagań)

^{b)} TBR – To Be Reported (do zadeklarowania)

4.1.2 Materiały do badań

Do oceny wpływu oddziaływania wysokiej temperatury wybrano lepiszcza powszechnie stosowane w Polsce do mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych jako izolacje mostowe oraz warstwy ochronne i ścieralne nawierzchni mostowej. Rodzaje asfaltów drogowych oraz polimeroasfaltów stosowanych do izolacji i warstw nawierzchni przedstawiono w tabl. 4-3. W tabl. 4-3 określono również rodzaj asfaltu naturalnego, który zastosowano do modyfikacji asfaltów drogowych. Asfalt naturalny jest dodatkiem powszechnie stosowanym do poprawy stabilności asfaltów drogowych, szczególnie, przy wytwarzaniu mieszanek mineralno-asfaltowych typu asfalt lany. Rodzaje lepiszczy drogowych, polimeroasfaltów oraz lepiszczy modyfikowanych asfaltem naturalnym przedstawiono w tabl. 4-4.

Tablica 4-3. Materiały wyjściowe do przygotowania lepiszczy do izolacji i nawierzchni mostowych

Rodzaj lepiszcza	Producent
Asfalt drogowy 50/70	Rafineria 1
Asfalt drogowy 35/50	
Asfalt drogowy 20/30	
Polimeroasfalt PmB 65/105-60	
Polimeroasfalt PmB 45/80-55	
Polimeroasfalt PmB 25/55-60	
Asfalt naturalny	Trinidad Epuré Z 0/8

Tablica 4-4. Lepiszcza do izolacji i nawierzchni mostowych

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Symbol próbki	Skład asfaltów modyfikowanych asfaltem Trinidad
1	Asfalt drogowy 50/70	50/70	-
2	Asfalt drogowy 35/50	35/50	
3	Asfalt drogowy 20/30	20/30	
4	Polimeroasfalt PmB 65/105-60	PmB 65/105-60	
5	Polimeroasfalt PmB 45/80-55	PmB 45/80-55	
6	Polimeroasfalt PmB 25/55-60	PmB 25/55-60	
7	Asfalt drogowy 50/70 + 1,0% (m/m) asfalt naturalny	50/70+1,0%as nat	99,0% (m/m) 50/70 + 1,0% (m/m) asf. nat.
8	Asfalt drogowy 50/70 + 1,5% (m/m) asfalt naturalny	50/70+1,5%as nat	98,5% (m/m) 50/70 + 1,5% (m/m) asf. nat.
9	Asfalt drogowy 50/70 + 2,0% (m/m) asfalt naturalny	50/70+2,0%as nat	98,0% (m/m) 50/70 + 2,0% (m/m) asf. nat.
10	Asfalt drogowy 35/50 + 1,0% (m/m) asfalt naturalny	35/50+1,0%as nat	99,0% (m/m) 35/50 + 1,0% (m/m) asf. nat.
11	Asfalt drogowy 35/50 + 1,5% (m/m) asfalt naturalny	35/50+1,5%as nat	98,5% (m/m) 35/50 + 1,5% (m/m) asf. nat.
12	Asfalt drogowy 35/50 + 2,0% (m/m) asfalt naturalny	35/50+2,0%as nat	98,0% (m/m) 35/50 + 2,0% (m/m) asf. nat.

Do podstawowych polimerowych modyfikatorów asfaltu należą polimery termoplastyczne - elastomery. Wybrane do badań polimeroasfalty należą do grupy elastomeroasfaltów. Elastomeroasfalty w temperaturze eksploatacyjnej charakteryzują się sprężystością natychmiastową (odkształcenia sprężyste > 100%) i opóźnioną (nawrót sprężysty) oraz szerokim temperaturowym zakresem lepkości sprężystości, co oznacza, że zachowują elastyczność w czasie ich użytkowania w szerokich granicach temperatury [35]. Powyższe właściwości odgrywają szczególną rolę w czasie eksploatacji asfaltowych izolacji i nawierzchni mostowych w polskiej strefie klimatycznej, wpływając na ich trwałość. W zależności od ilości zastosowanego do modyfikacji polimeru i składu grupowego asfaltu, polimer może tworzyć w asfalcie przestrzenną fizyczną sieć. Dzięki modyfikacji asfaltu elastomerami poprawia się odporność nawierzchni na odkształcenia trwałe, spękania zmęczeniowe i spękania indukowane termicznie.

Asfalt naturalny stosowany jest w budownictwie drogowym do modyfikacji asfaltów ponaftowych w celu zwiększenia ich twardości. Dodatek asfaltu naturalnego do asfaltu ponaftowego powoduje wzrost lepkości i zmniejszenie penetracji asfaltów wyjściowych a także poprawę adhezji asfaltu do kruszywa [6,

35]. Dodatek asfaltu naturalnego Trinidad (rys. 4-1) zalecany jest przede wszystkim do wytwarzania asfaltów lanych przeznaczonych do warstw ścieralnych, ochronnych i izolacji obiektów mostowych silnie obciążonych ruchem. Szczególnie korzystne jest oddziaływanie dodatku asfaltu Trinidad na urabialność i zagęszczalność mieszanek mineralno-asfaltowych. Uzyskuje się ponadto wyraźne podwyższenie odporności na odkształcenia trwałe warstw nawierzchni wykonanych z tym dodatkiem [36].



Rys. 4-1. Asfalt naturalny Trinidad Epuré Z 0/8

Modyfikację asfaltów drogowych dodatkiem asfaltu naturalnego Trinidad Epuré Z 0/8 przeprowadzono według następującej procedury:

- | | |
|----------------------------|------------------------------------|
| • sposób mieszania: | mieszadło wolnoobrotowe łopatkowe, |
| • liczba obrotów: | 200 obr/min, |
| • czas mieszania: | 10 minut, |
| • temperatura modyfikacji: | 150-160°C. |

4.1.3 Program badań lepiszczy

W celu określenia odporności na wysokie temperatury przy wytwarzaniu, transporcie i układaniu mieszanek mineralno-asfaltowych, wymienione w tabl. 4-4 lepiszcza poddano oddziaływaniu wysokiej temperatury, przyjmując trzy temperatury wygrzewania: 200, 250 i 300°C. Czas wygrzewania wynosił 1 godzinę. Jak wykazuje praktyka, lepiszcza do izolacji i nawierzchni mostowych, podczas produkcji i układania mieszanek mineralno-asfaltowych mogą być narażone na tak wysokie temperatury, utrzymujące się do 1 godziny. Dodatkowo, lepiszcze w izolacji lub w warstwie ochronnej jest ponownie rozgrzewane po ułożeniu kolejnej, gorącej warstwy nawierzchni.

W celu oceny wpływu wysokiej temperatury technologicznej określono właściwości podstawowe oraz reologiczne lepiszczy. Badania cech podstawowych (normowych) asfaltów drogowych wykonano zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12591 [N2] a badania lepiszczy modyfikowanych polimerami wykonano zgodnie z normą PN-EN 14023 [N3]. Badania wg normy PN-EN 12591 i PN-EN 14023 są niezbędne do klasyfikacji lepiszczy asfaltowych pod względem zgodności z obowiązującymi wymaganiami i należą do grupy badań klasyfikacyjnych.

W celu oceny wpływu wysokiej temperatury na właściwości lepiszczy podczas procesów technologicznych wykonano badania lepkości dynamicznej. Badanie lepkości dynamicznej w aparacie Brookfielda służy do oceny konsystencji lepiszczy asfaltowych w wysokiej temperaturze (100°C – 180°C), co umożliwia ustalanie temperatury procesów technologicznych. Badanie to pozwala w szybki sposób kontrolować zmiany konsystencji lepiszcza asfaltowego, w szerokim zakresie temperatur technologicznych.

Szczegółowy program badań lepiszczy do izolacji i nawierzchni mostowych przedstawiono poniżej:

- pomiar penetracji w temperaturze 25°C, wg PN-EN 1426 [N4],
- pomiar temperatury mięknięcia wg PiK, wg PN-EN 1427 [N5],
- określenie lepkości wg Brookfielda, wg PN-EN 13302 [N6], w temperaturze 60°C, 90°C, 110°C i 135°C.

4.1.4 Wyniki badań lepiszczy

Wyniki badań właściwości podstawowych i reologicznych lepiszczy nie wygrzewanych (oryginalnych) oraz wygrzewanych w temperaturze 200, 250 i 300°C przedstawiono w tabl. 4-5 do 4-16. Wynik określony literą „D” oznacza brak możliwości pomiaru lepkości spowodowany zbyt niską temperaturą badania, uniemożliwiającą pomiar w reometrze obrotowym Brookfielda. Na rys. 4-2 do 4-25 przedstawiono w formie graficznej indeksy zmiany konsystencji określone na podstawie pomiarów penetracji (25°C) i temperatury mięknienia w funkcji temperatury wygrzewania 200, 250 i 300°C oraz indeksy stwardnienia obliczone na podstawie pomiarów lepkości dynamicznej w 90°C w funkcji temperatury wygrzewania 200, 250 i 300°C.

Indeks zmiany konsystencji $ISpen$ obliczono na podstawie wzoru:

$$ISpen_{25} = \frac{Pen_{25} (200; 250; 300^{\circ}C)}{Pen_{25}} \quad (6)$$

gdzie:

$Pen_{25} (200; 250; 300^{\circ}C)$ – penetracja po wygrzewaniu w temp. 200, 250, 300°C określona w 25°C,

Pen_{25} – penetracja przed wygrzewaniem określona w 25°C.

Indeks zmiany konsystencji $ISTPiK$ obliczono na podstawie wzoru:

$$ISTPiK = \frac{TPiK (200; 250; 300^{\circ}C)}{TPiK} \quad (7)$$

gdzie:

$TPiK (200; 250; 300^{\circ}C)$ – temperatura mięknienia po wygrzewaniu w temp. 200, 250, 300°C,

$TPiK$ – temperatura mięknienia przed wygrzewaniem.

Indeks stwardnienia obliczono na podstawie wzoru:

$$ISlepkości = \frac{\eta' (200; 250; 300^{\circ}C)}{\eta} \quad (8)$$

gdzie:

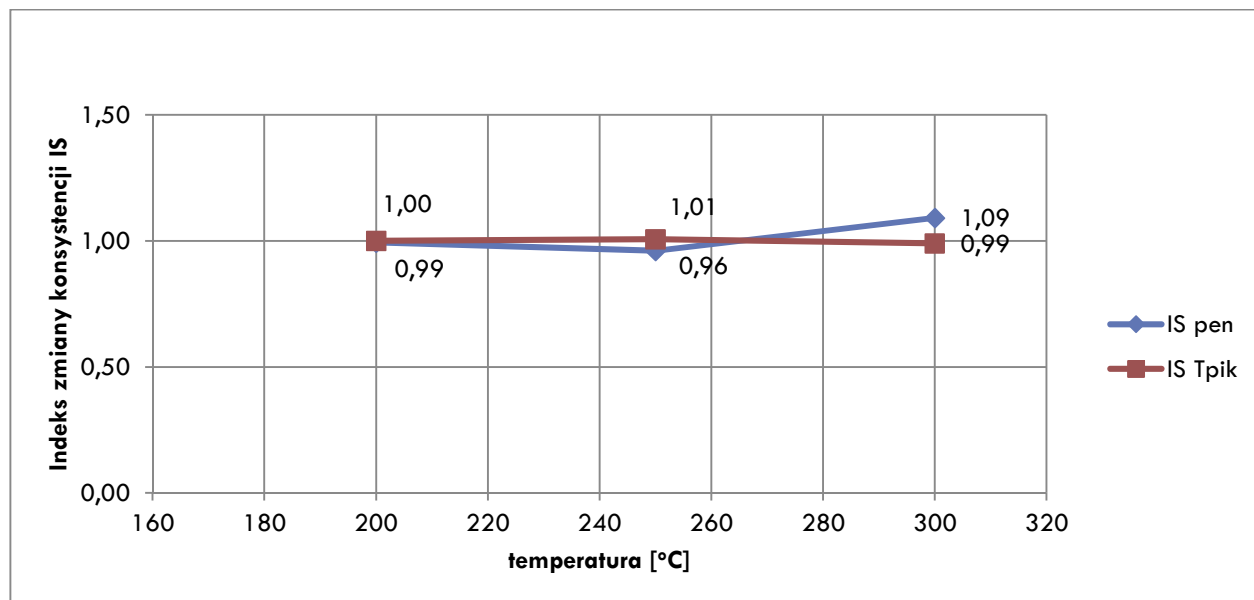
$\eta' (200; 250; 300^{\circ}C)$ – lepkość dynamiczna po wygrzewaniu w temp. 200, 250, 300°C,

η – lepkość dynamiczna przed wygrzewaniem.

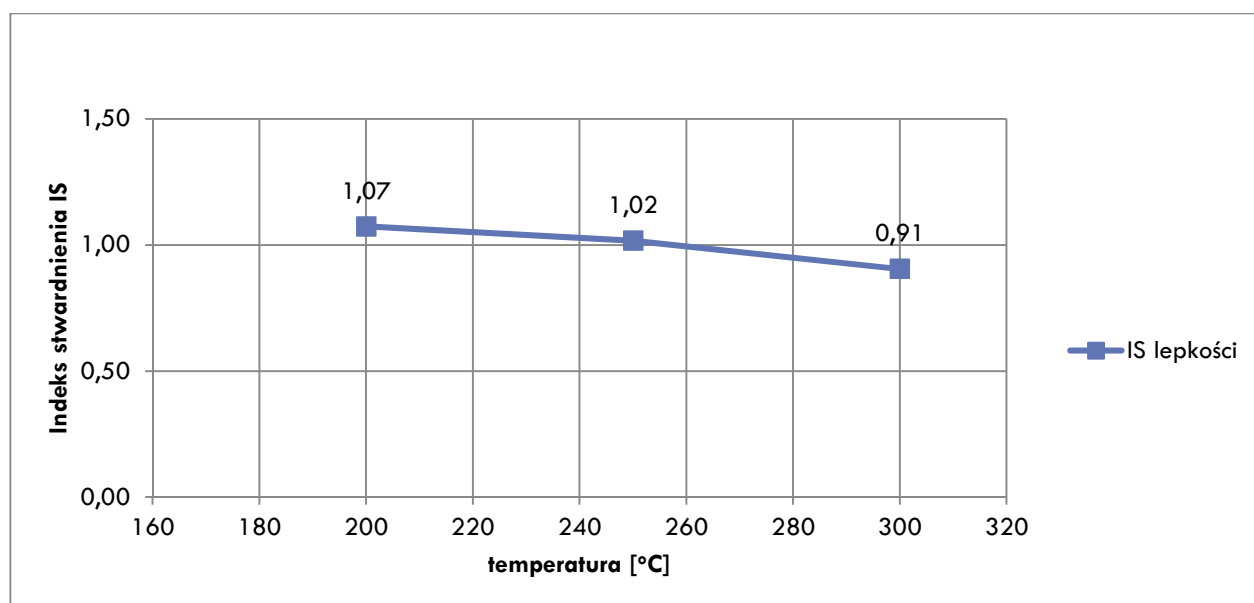
Tablica 4-5. Wyniki badań asfaltu 50/70 do izolacji i nawierzchni mostowych

Właściwość	Norma	Jednostka	Temperatura wygrzewania (czas: 1h)			
			-	200°C	250°C	300°C
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	57,1	56,7	54,8	62,3
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427	°C	48,9	48,9	49,2	48,4
Lepkość dynamiczna, 60°C	PN-EN 13302	Pa·s	312,86	302,08	297,88	D ¹
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302	Pa·s	9,06	9,72	9,21	8,20
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	1,92	1,99	1,93	1,76
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	0,45	0,46	0,45	0,42

(¹) - brak możliwości dokonania pomiaru



Rys. 4-2. Indeks zmiany konsystencji (penetracja, T PiK) asfaltu 50/70 w funkcji temperatury wygrzewania lepiscza

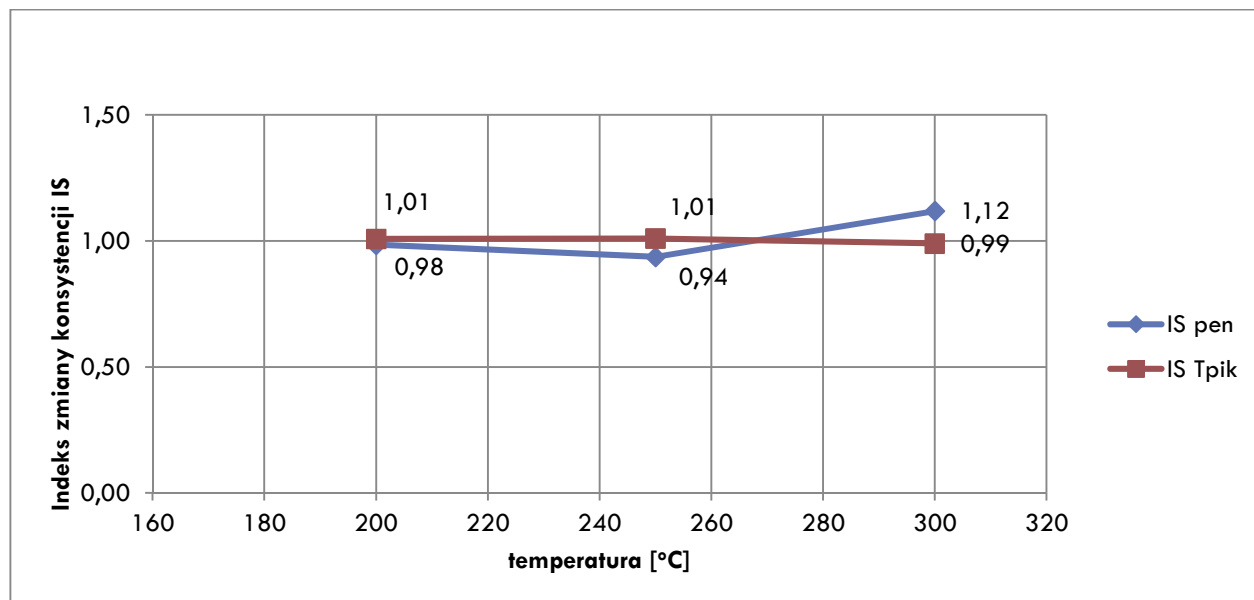


Rys. 4-3. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu 50/70 w funkcji temperatury wygrzewania lepiscza

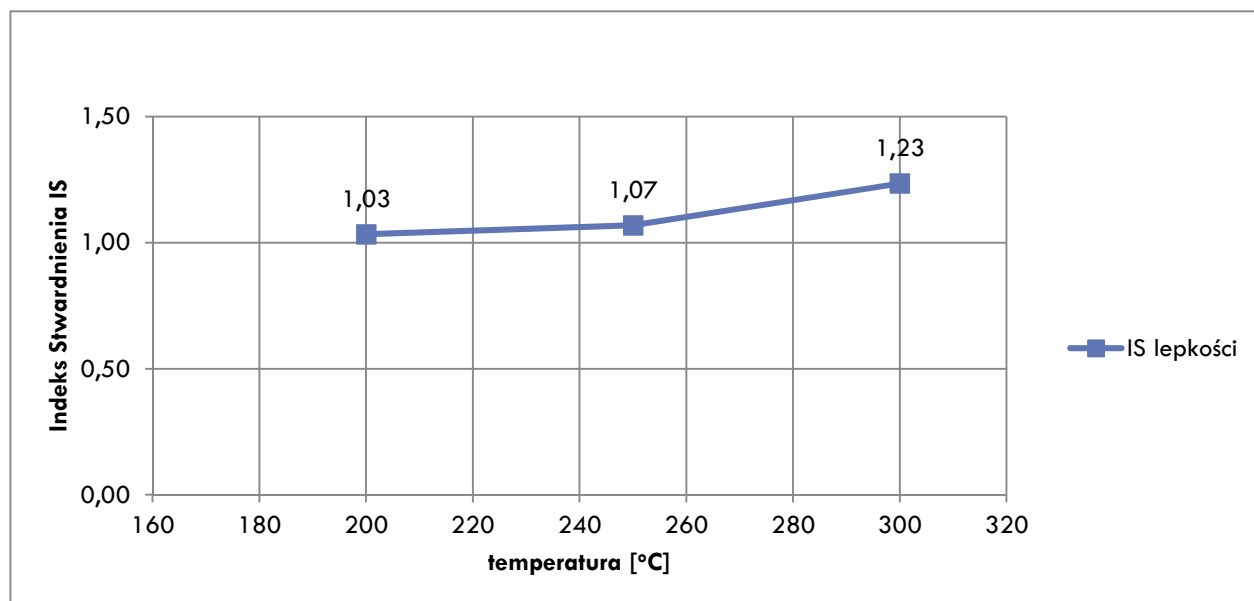
Tablica 4-6. Wyniki badań asfaltu 35/50 do izolacji i nawierzchni mostowych

Właściwość	Norma	Jednostka	Temperatura wygrzewania (czas: 1h)			
			-	200°C	250°C	300°C
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	37,3	36,7	34,9	41,7
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427	°C	54,3	54,7	54,8	53,7
Lepkość dynamiczna, 60°C	PN-EN 13302	Pa·s	769,17	D ¹	D ¹	D ¹
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302	Pa·s	18,60	19,21	19,88	22,97
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	3,38	3,51	3,50	3,14
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	0,70	0,72	0,74	0,66

(¹) - brak możliwości dokonania pomiaru



Rys. 4-4. Indeks zmiany konsystencji (penetracja, T PiK) asfaltu 35/50 w funkcji temperatury wygrzewania lepiscza

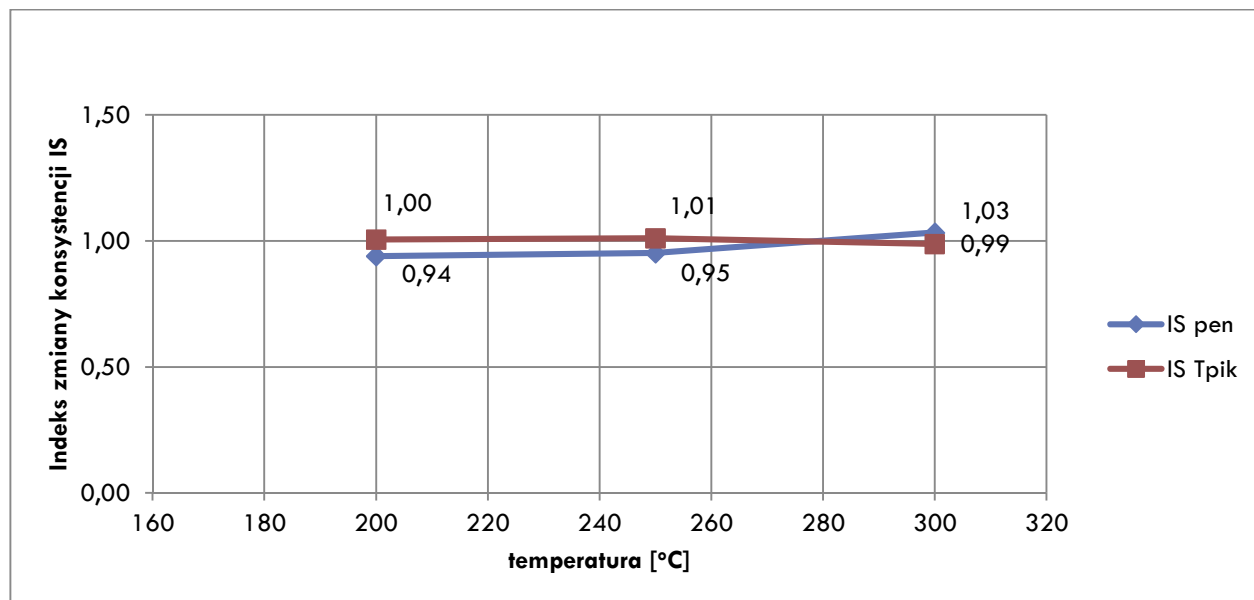


Rys. 4-5. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu 35/50 w funkcji temperatury wygrzewania lepiscza

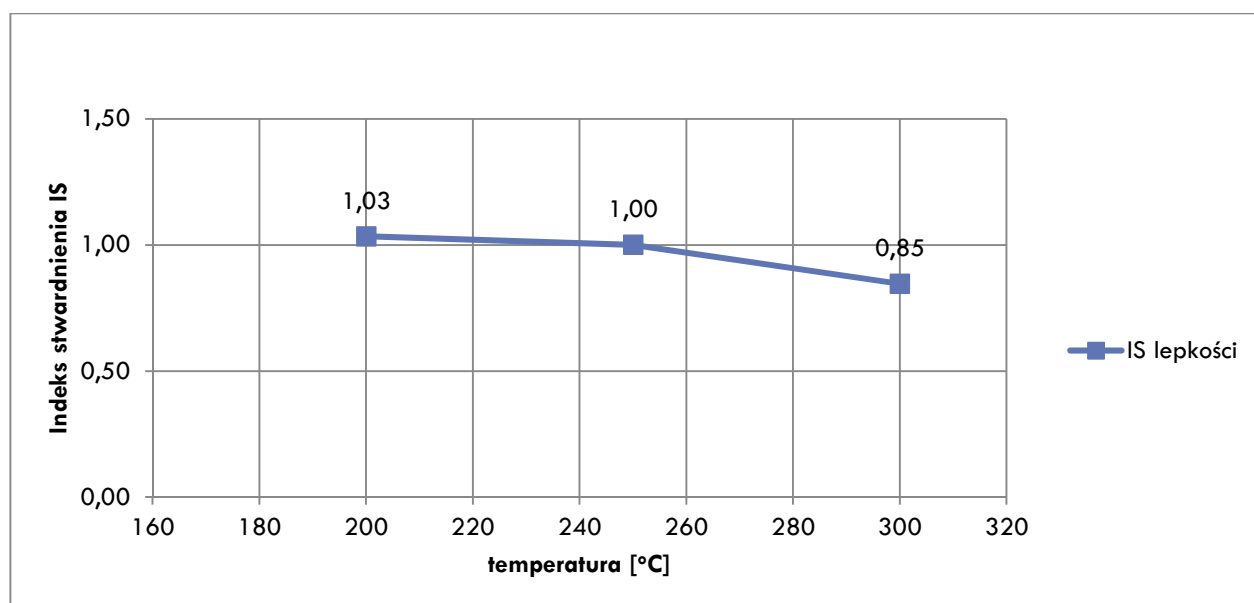
Tablica 4-7. Wyniki badań asfaltu 20/30 do izolacji i nawierzchni mostowych

Właściwość	Norma	Jednostka	Temperatura wygrzewania (czas: 1h)			
			-	200°C	250°C	300°C
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	24,5	23	23,3	25,3
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427	°C	61,40	61,7	62	60,6
Lepkość dynamiczna, 60°C	PN-EN 13302	Pa·s	D ¹	D ¹	D ¹	D ¹
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302	Pa·s	49,44	51,11	49,45	41,80
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	7,48	7,46	7,50	6,39
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	1,29	1,31	1,29	1,14

(¹) - brak możliwości dokonania pomiaru



Rys. 4-6. Indeks zmiany konsystencji (penetracja, T PiK) asfaltu 20/30 w funkcji temperatury wygrzewania lepiscza

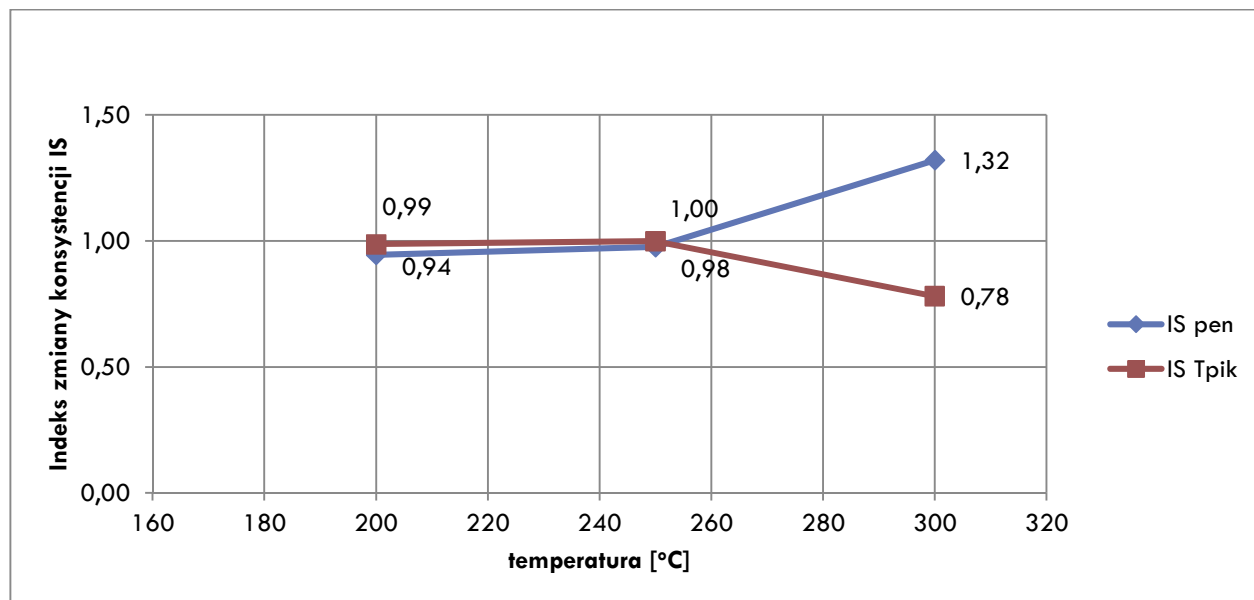


Rys. 4-7. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu 20/30 w funkcji temperatury wygrzewania lepiscza

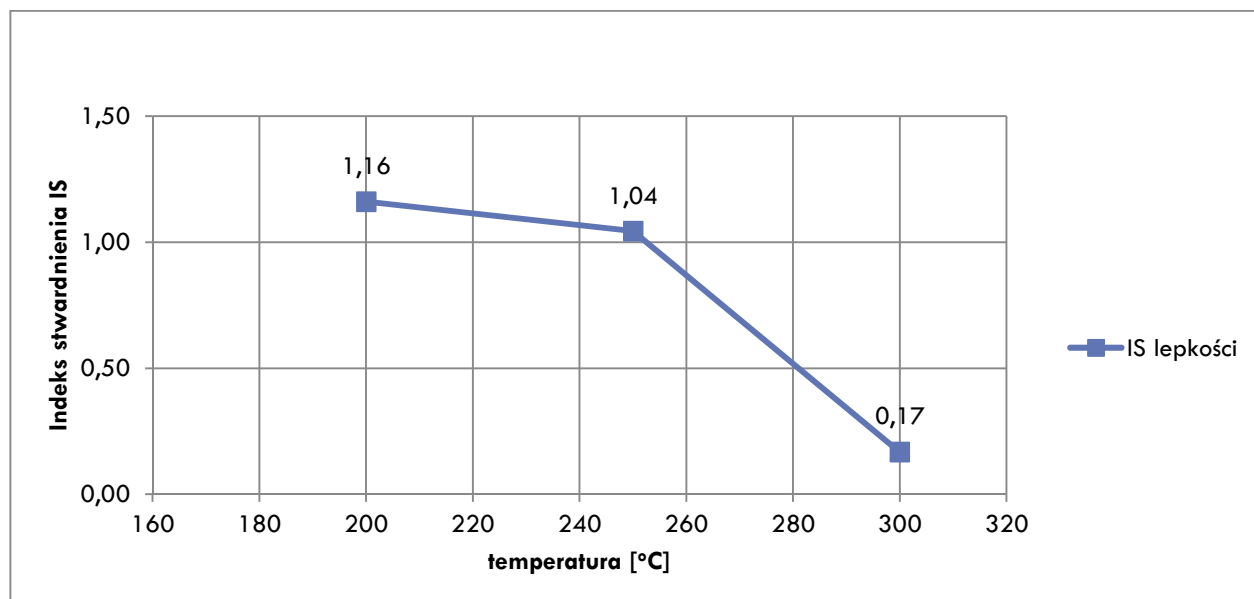
Tablica 4-8. Wyniki badań asfaltu PmB 65/105-60 do izolacji i nawierzchni mostowych

Właściwość	Norma	Jednostka	Temperatura wygrzewania (czas: 1h)			
			-	200°C	250°C	300°C
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	64,7	61,1	63,1	85,4
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427	°C	60,6	59,8	60,5	47,3
Lepkość dynamiczna, 60°C	PN-EN 13302	Pa·s	D ¹	D ¹	D ¹	D ¹
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302	Pa·s	55,56	64,50	58,00	9,29
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	6,98	6,96	6,58	2,09
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	1,25	1,23	1,13	0,52

(¹) - brak możliwości dokonania pomiaru



Rys. 4-8. Indeks zmiany konsystencji (penetracja, T PiK) asfaltu PmB 65/105-60 w funkcji temperatury wygrzewania lepiscza

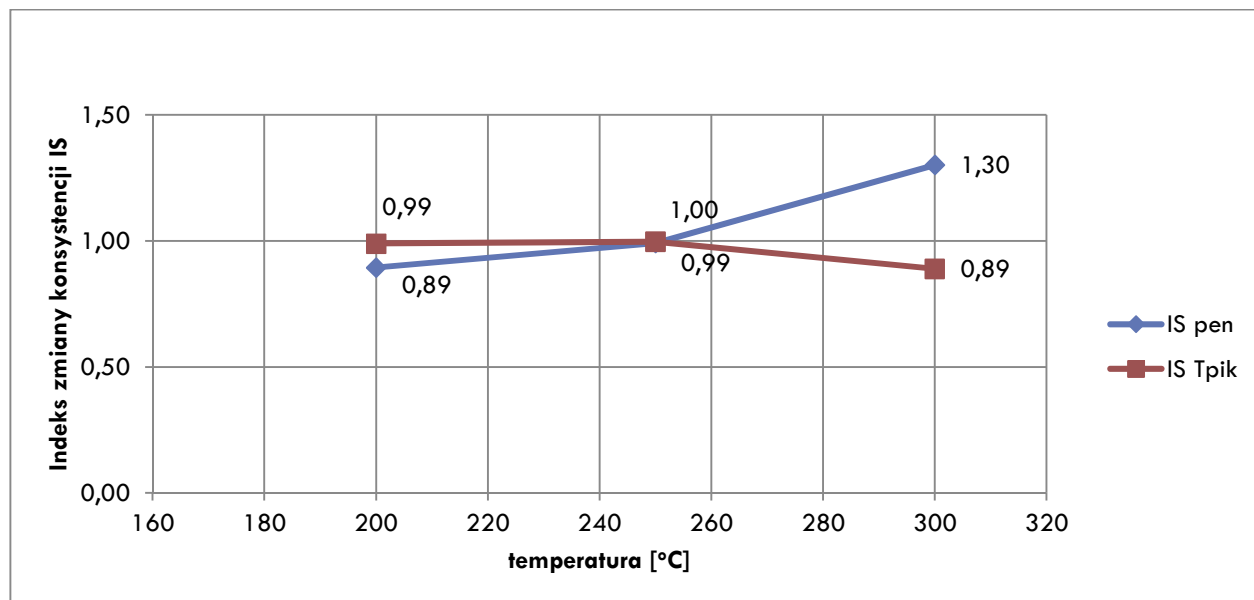


Rys. 4-9. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu PmB 65/105-60 w funkcji temperatury wygrzewania lepiscza

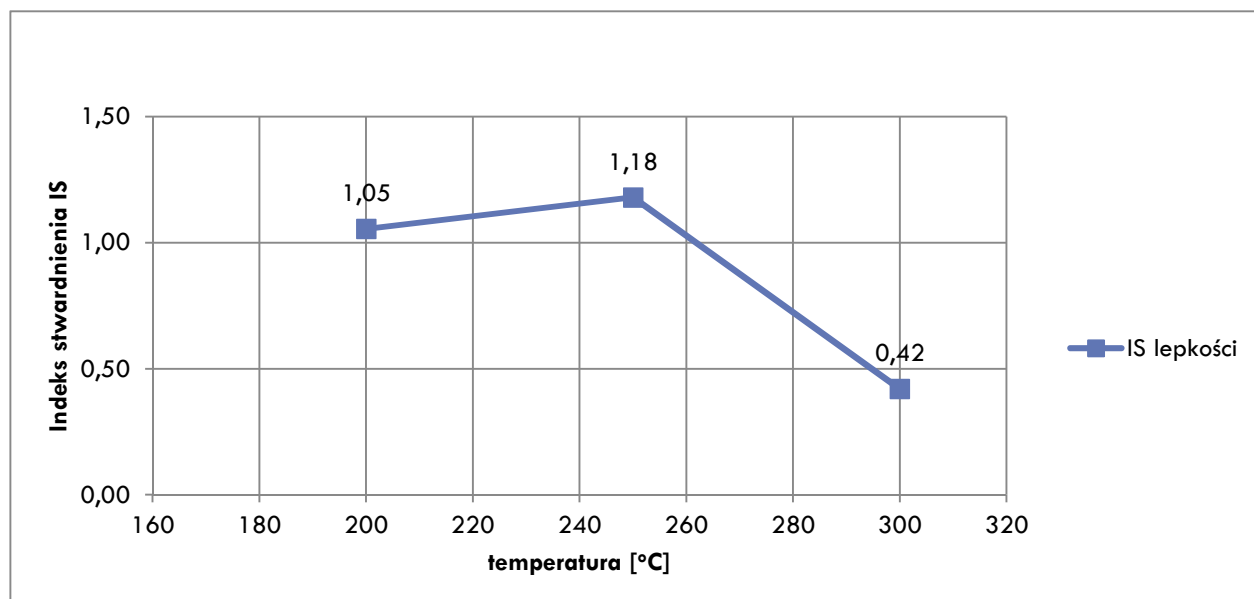
Tablica 4-9. Wyniki badań asfaltu PmB 45/80-55 do izolacji i nawierzchni mostowych

Właściwość	Norma	Jednostka	Temperatura wygrzewania (czas: 1h)			
			-	200°C	250°C	300°C
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	46,2	41,3	45,8	60,1
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427	°C	56,6	56,0	56,4	50,3
Lepkość dynamiczna, 60°C	PN-EN 13302	Pa·s	1010,00	D ¹	D ¹	D ¹
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302	Pa·s	28,78	30,36	33,96	12,09
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	5,06	5,33	5,37	2,49
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	1,14	1,16	1,07	0,57

(¹) - brak możliwości dokonania pomiaru



Rys. 4-10. Indeks zmiany konsystencji (penetracja, T PiK) asfaltu PmB 45/80-55 w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

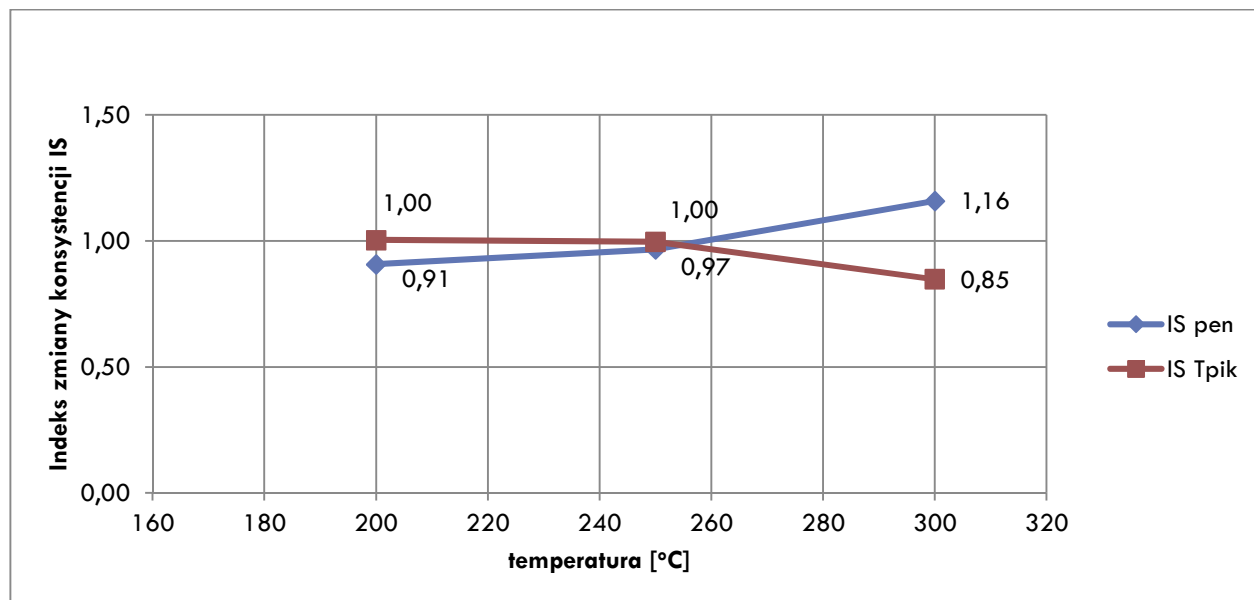


Rys. 4-11. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu PmB 45/80-55 w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

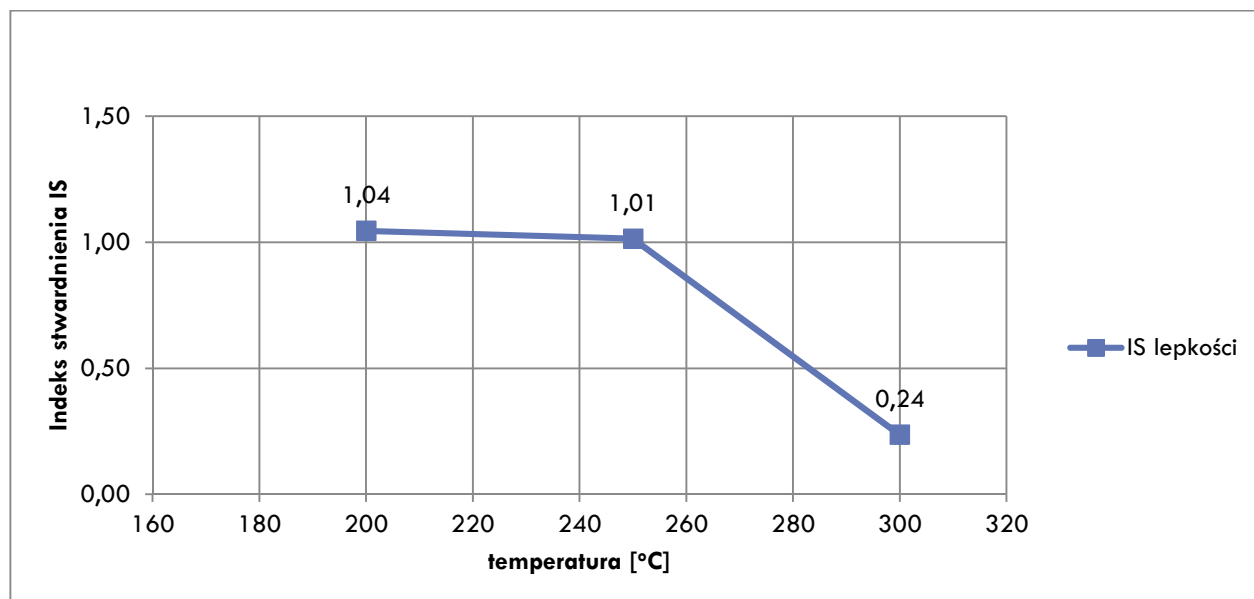
Tablica 4-10. Wyniki badań asfaltu PmB 25/55-60 do izolacji i nawierzchni mostowych

Właściwość	Norma	Jednostka	Temperatura wygrzewania (czas: 1h)			
			-	200°C	250°C	300°C
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	32,2	29,2	31,1	37,3
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427	°C	67,0	67,2	66,7	56,8
Lepkość dynamiczna, 60°C	PN-EN 13302	Pa·s	D ¹	D ¹	D ¹	D ¹
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302	Pa·s	110,13	115,00	111,63	25,97
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	12,20	12,40	12,38	4,63
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	1,86	1,89	1,85	0,92

(¹) - brak możliwości dokonania pomiaru



Rys. 4-12. Indeks zmiany konsystencji (penetracja, T PiK) asfaltu PmB 25/55-60 w funkcji temperatury wygrzewania lepiscza

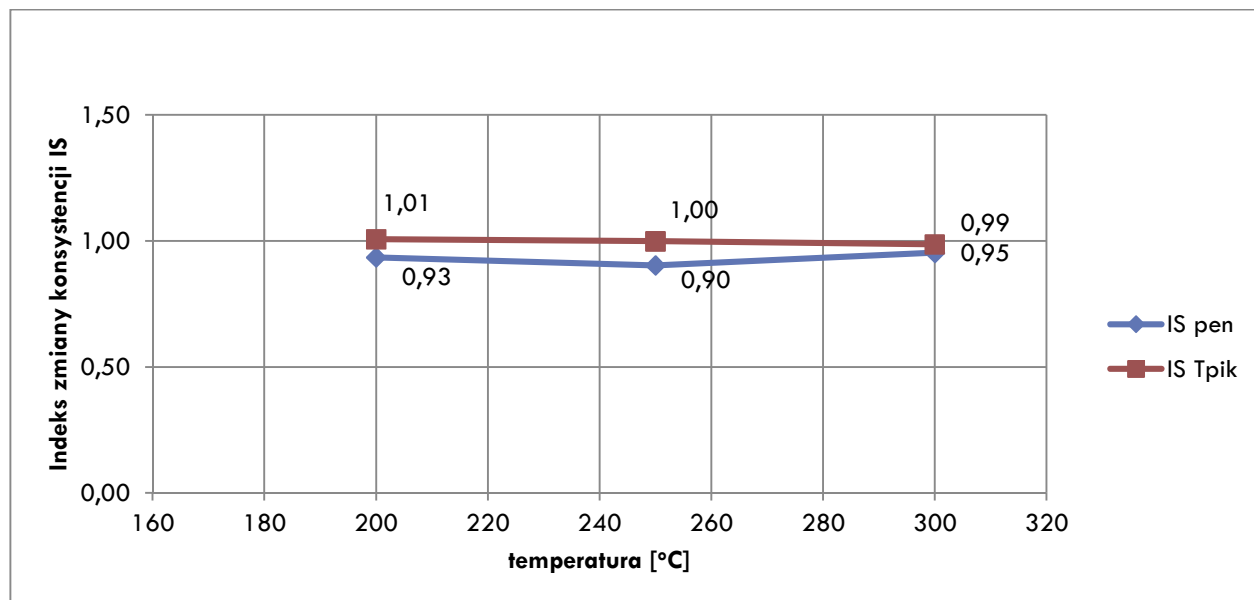


Rys. 4-13. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu PmB 25/55-60 w funkcji temperatury wygrzewania lepiscza

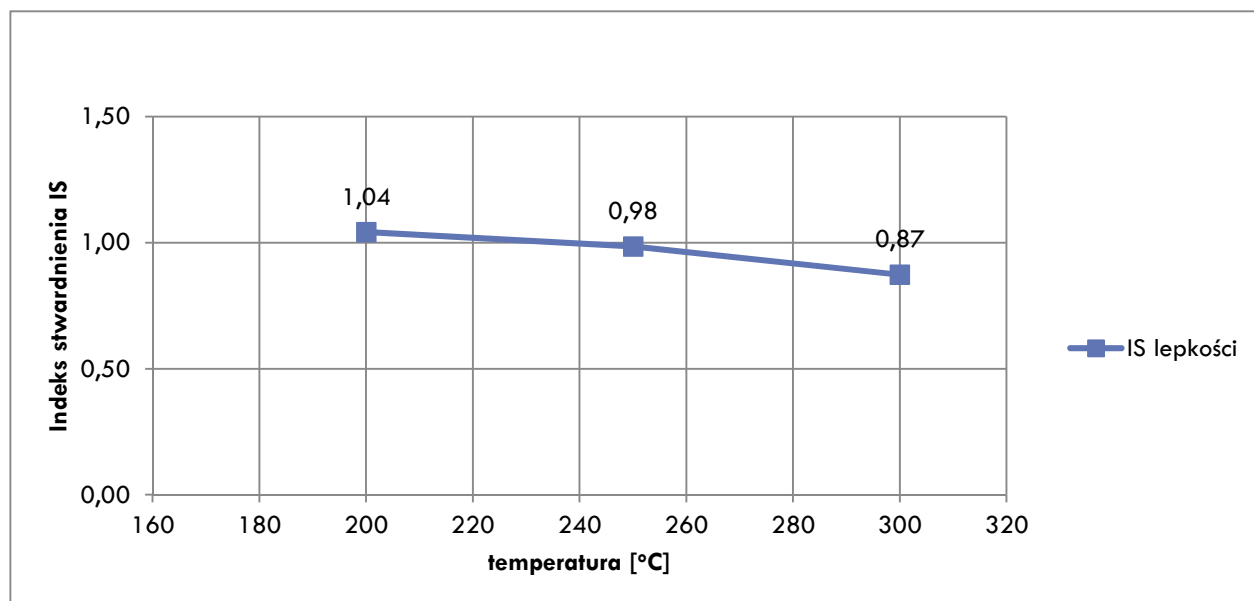
Tablica 4-11. Wyniki badań asfaltu 50/70+1,0% asf. nat. do izolacji i nawierzchni mostowych

Właściwość	Norma	Jednostka	Temperatura wygrzewania (czas: 1h)			
			-	200°C	250°C	300°C
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	59,2	55,3	53,4	56,4
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427	°C	49,4	49,7	49,3	48,7
Lepkość dynamiczna, 60°C	PN-EN 13302	Pa·s	D ¹	D ¹	D ¹	D ¹
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302	Pa·s	9,77	10,18	9,62	8,53
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	2,06	2,05	2,00	1,82
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	0,48	0,47	0,46	0,44

(¹) - brak możliwości dokonania pomiaru



Rys. 4-14. Indeks zmiany konsystencji (penetracja, T PiK) asfaltu 50/70+1,0% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiska

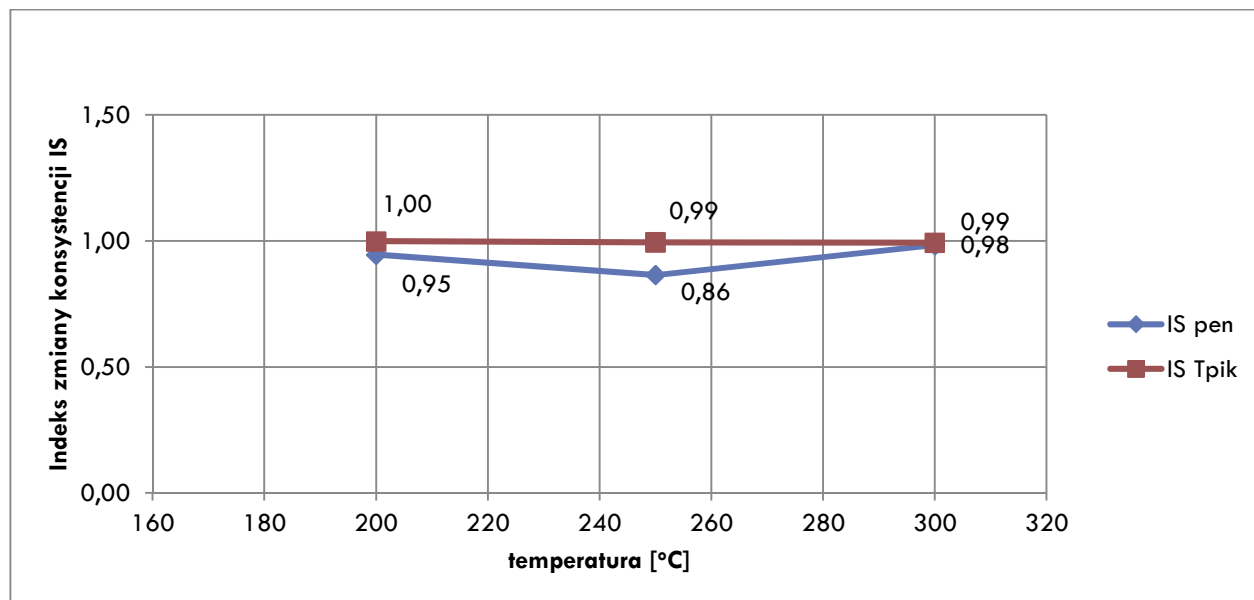


Rys. 4-15. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu 50/70+1,0% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiska

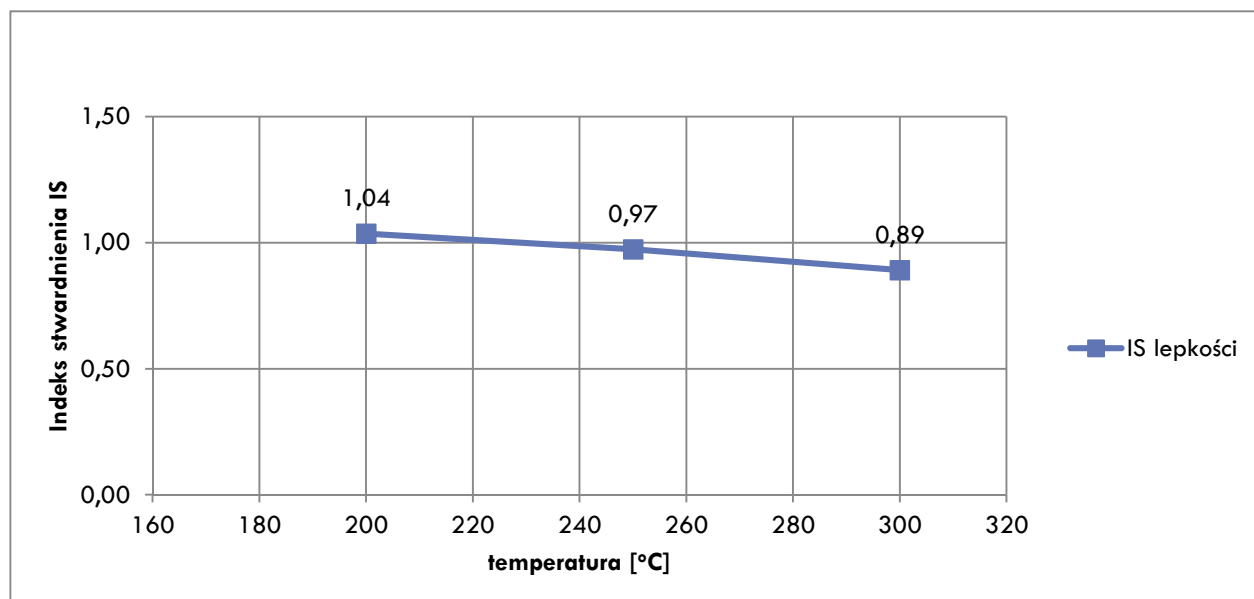
Tablica 4-12. Wyniki badań asfaltu 50/70+1,5% asf. nat. do izolacji i nawierzchni mostowych

Właściwość	Norma	Jednostka	Temperatura wygrzewania (czas: 1h)			
			-	200°C	250°C	300°C
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	58,2	55	50,3	57,2
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427	°C	49,6	49,5	49,3	49,2
Lepkość dynamiczna, 60°C	PN-EN 13302	Pa·s	D ¹	D ¹	D ¹	D ¹
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302	Pa·s	9,82	10,17	9,56	8,75
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	2,08	2,07	2,05	1,86
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	0,49	0,48	0,47	0,44

(¹) - brak możliwości dokonania pomiaru



Rys. 4-16. Indeks zmiany konsystencji (penetracja, T PiK) asfaltu 50/70+1,5% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiska

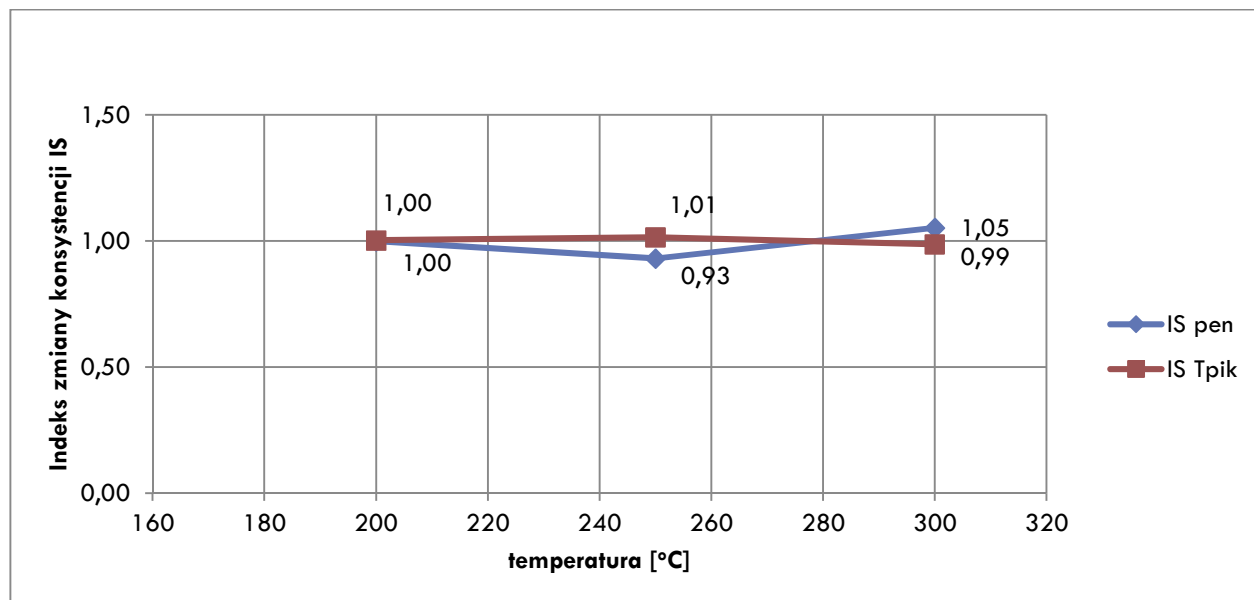


Rys. 4-17. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu 50/70+1,5% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiska

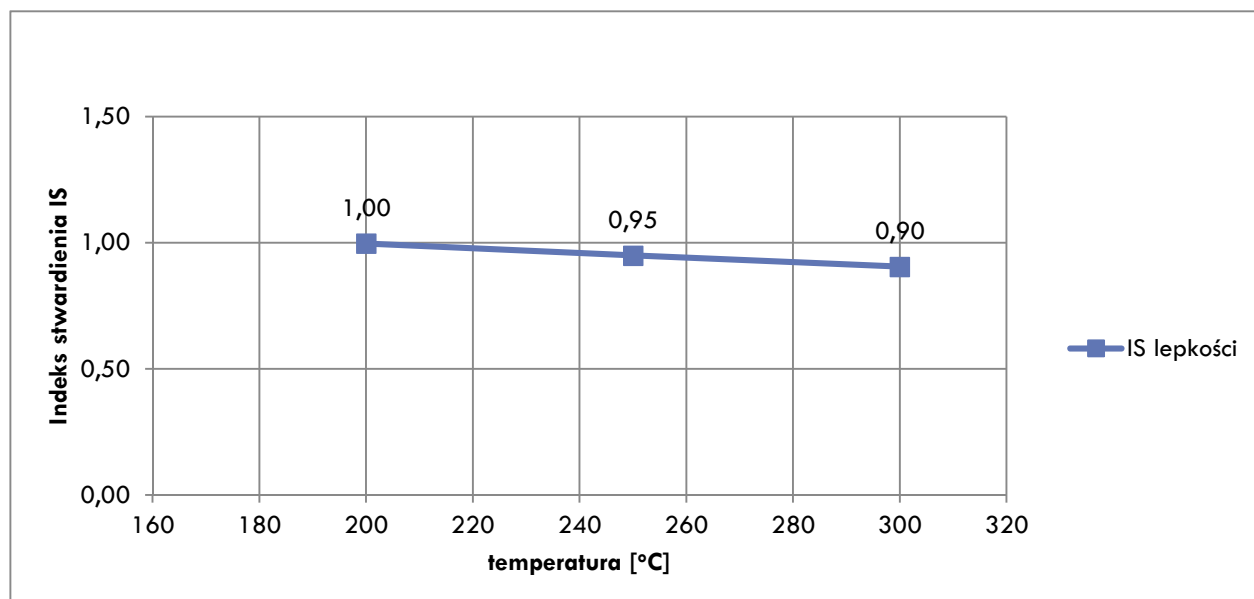
Tablica 4-13. Wyniki badań asfaltu 50/70+2,0% asf. nat. do izolacji i nawierzchni mostowych

Właściwość	Norma	Jednostka	Temperatura wygrzewania (czas: 1h)			
			-	200°C	250°C	300°C
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	54,1	54,0	50,3	56,9
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427	°C	49,6	49,7	50,3	48,9
Lepkość dynamiczna, 60°C	PN-EN 13302	Pa·s	D ¹	D ¹	D ¹	D ¹
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302	Pa·s	10,7	10,66	10,15	9,68
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	2,08	2,10	2,10	1,84
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	0,48	0,47	0,49	0,44

(¹) - brak możliwości dokonania pomiaru



Rys. 4-18. Indeks zmiany konsystencji (penetracja, T PiK) asfaltu 50/70+2,0% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiska

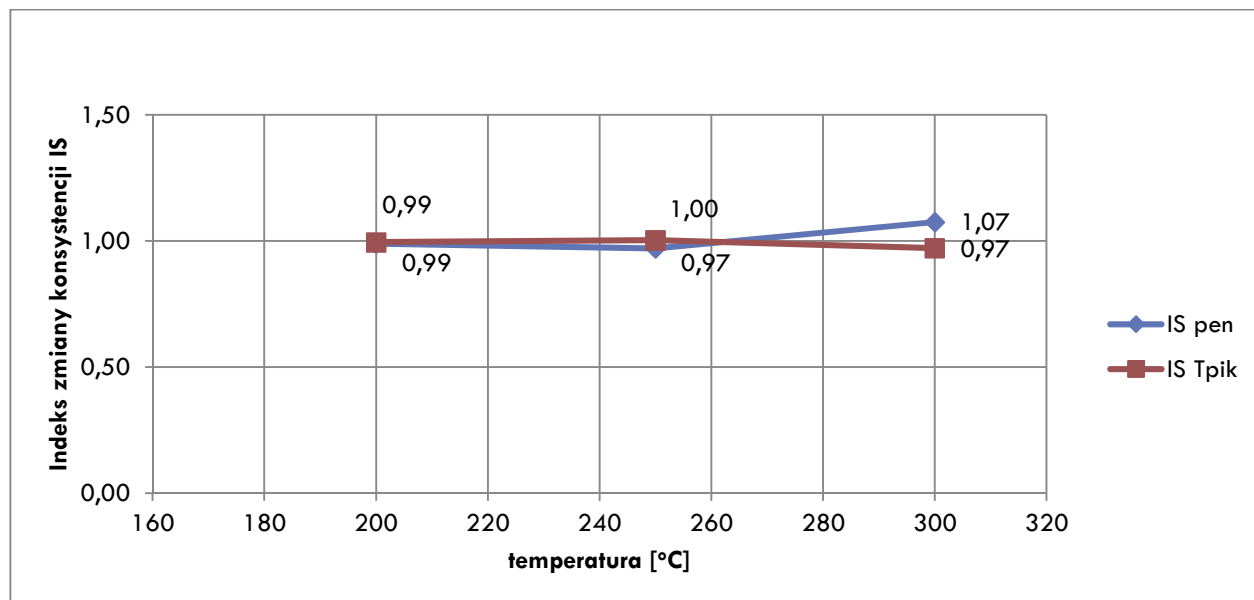


Rys. 4-19. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu 50/70+2,0% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiska

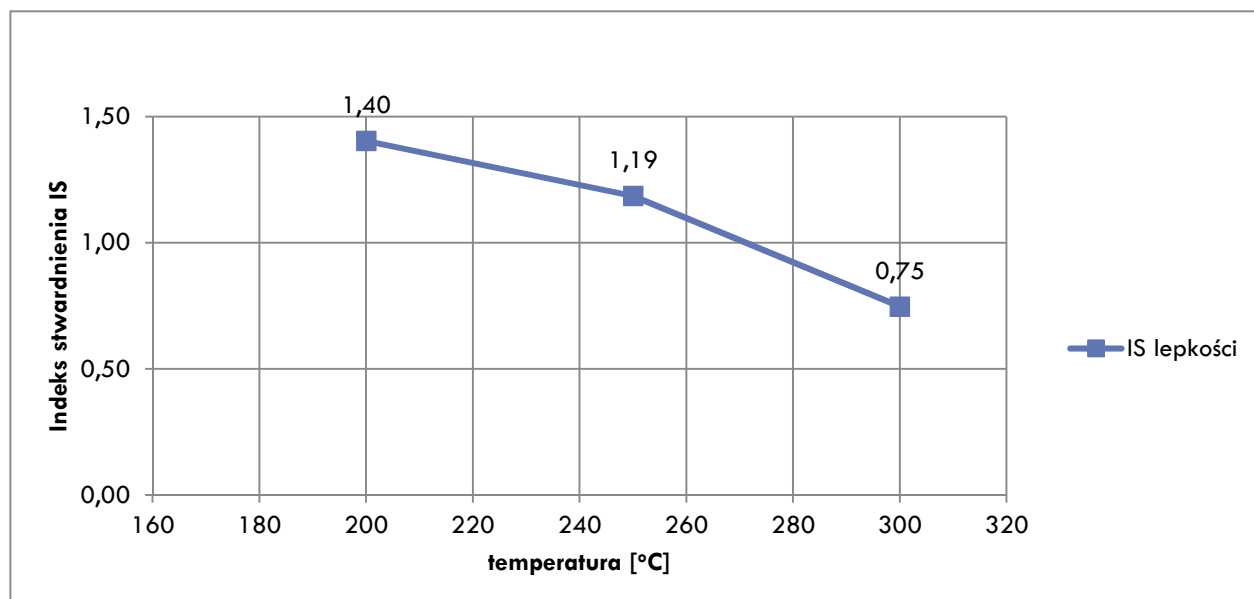
Tablica 4-14. Wyniki badań asfaltu 35/50+1,0% asf. nat. do izolacji i nawierzchni mostowych

Właściwość	Norma	Jednostka	Temperatura wygrzewania (czas: 1h)			
			-	200°C	250°C	300°C
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	36,2	35,8	35,1	38,9
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427	°C	55,0	54,7	55,1	53,4
Lepkość dynamiczna, 60°C	PN-EN 13302	Pa·s	D ¹	D ¹	D ¹	D ¹
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302	Pa·s	21,85	30,68	25,91	16,3166
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	3,56	3,65	3,62	3,15
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	0,72	0,74	0,73	0,66

(¹) - brak możliwości dokonania pomiaru



Rys. 4-20. Indeks zmiany konsystencji (penetracja, T PiK) 35/50+1,0% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiscza

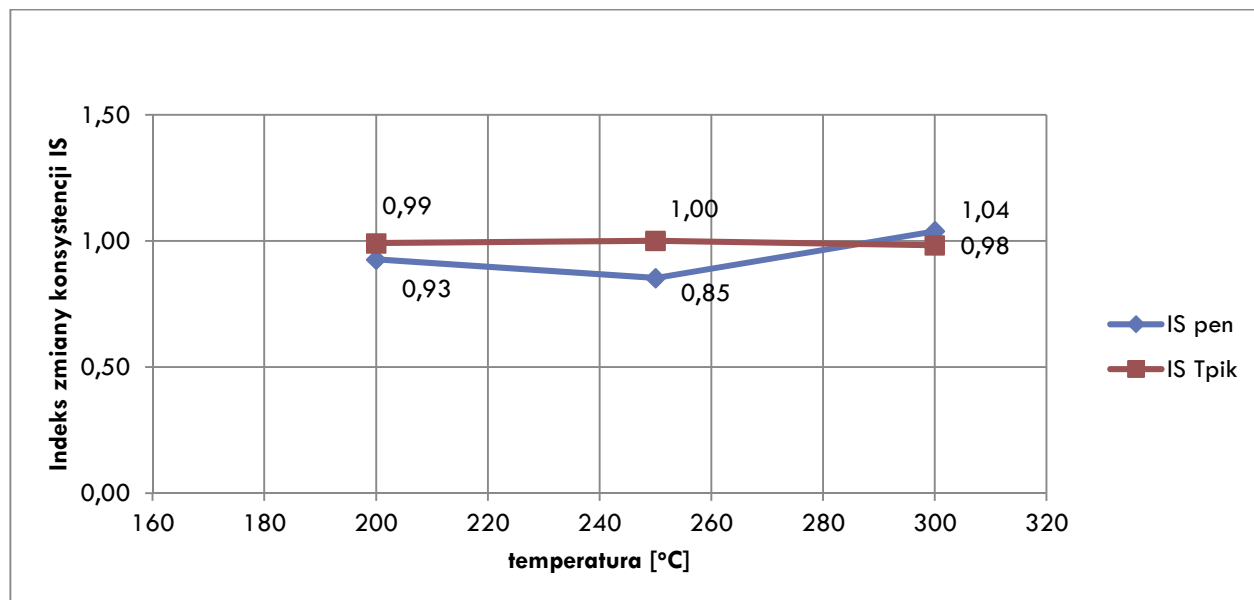


Rys. 4-21. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) 35/50+1,0% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiscza

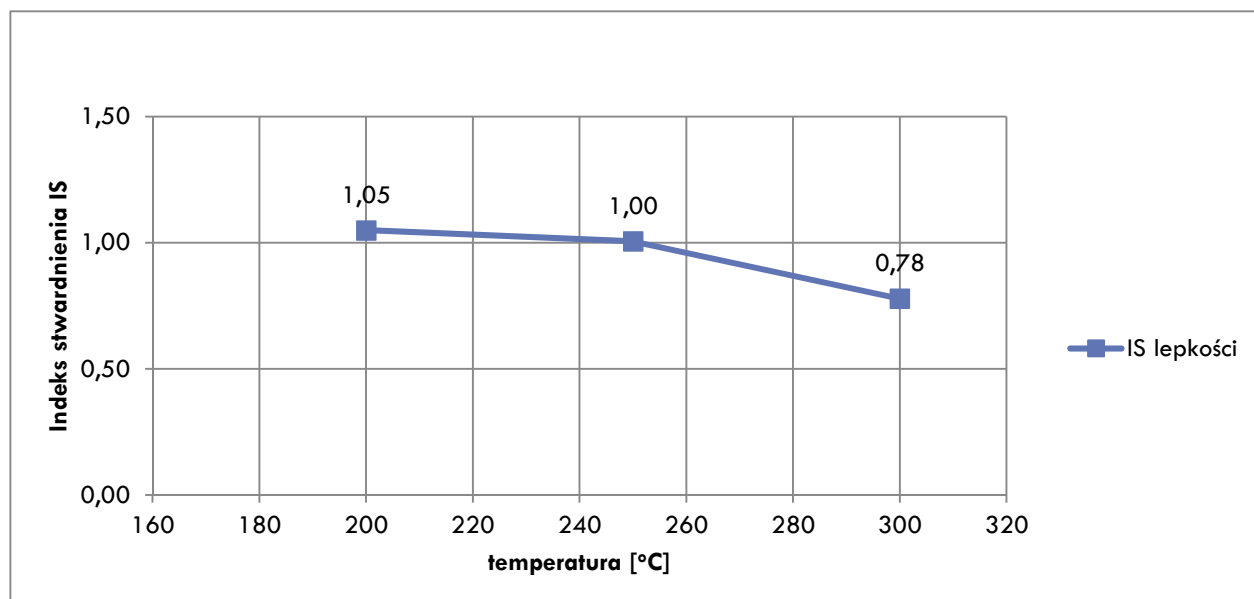
Tablica 4-15. Wyniki badań asfaltu 35/50+1,5% asf. nat. do izolacji i nawierzchni mostowych

Właściwość	Norma	Jednostka	Temperatura wygrzewania (czas: 1h)			
			-	200°C	250°C	300°C
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	39,2	36,3	33,4	40,7
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427	°C	54,9	54,4	54,9	53,9
Lepkość dynamiczna, 60°C	PN-EN 13302	Pa·s	D ¹	D ¹	D ¹	D ¹
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302	Pa·s	20,05	21,03	20,15	15,60
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	3,67	3,67	3,73	3,05
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	0,74	0,75	0,77	0,64

(¹) - brak możliwości dokonania pomiaru



Rys. 4-22. Indeks zmiany konsystencji (penetracja, T PiK) asfaltu 35/50+1,5% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiscza

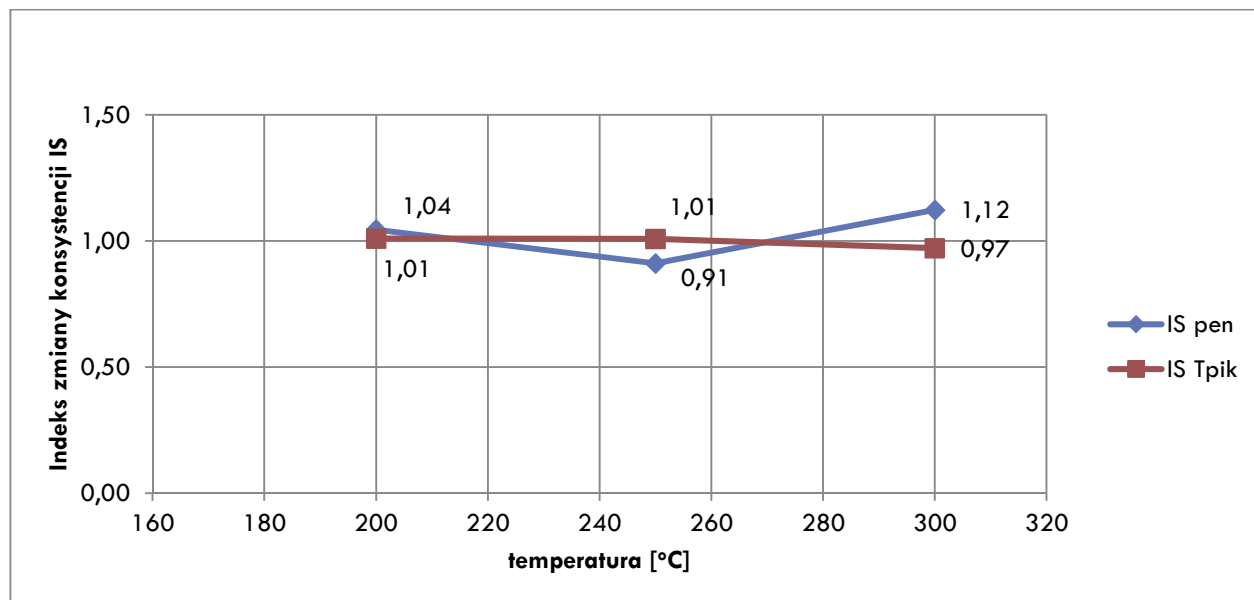


Rys. 4-23. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu 35/50+1,5% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiscza

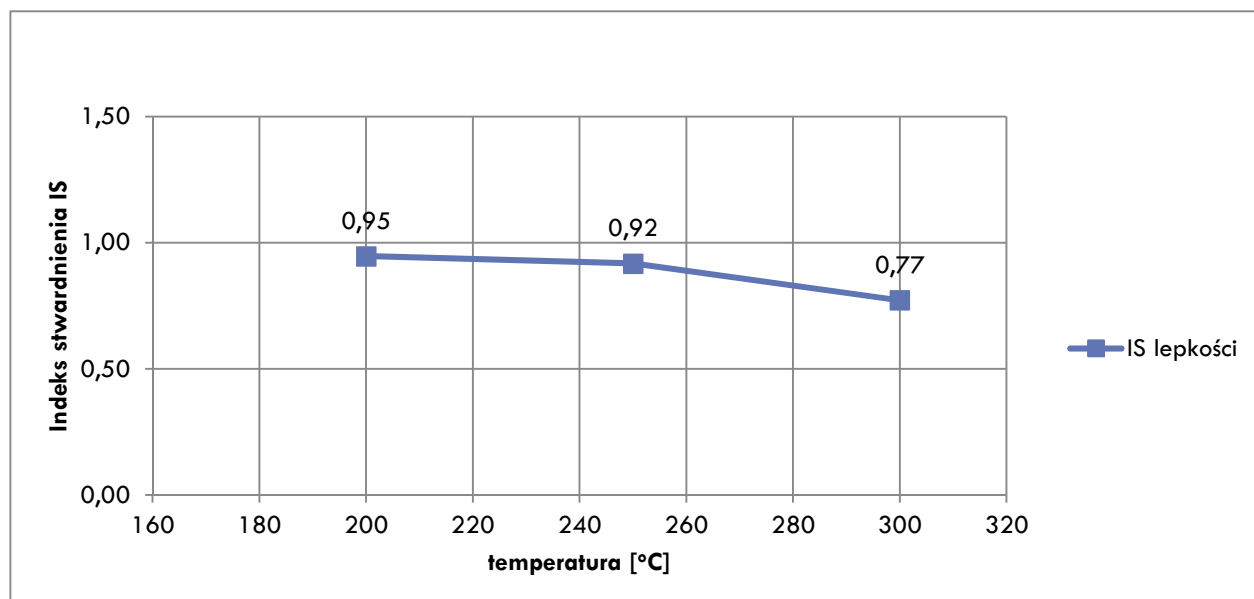
Tablica 4-16. Wyniki badań asfaltu 35/50+2,0% asf. nat. do izolacji i nawierzchni mostowych

Właściwość	Norma	Jednostka	Temperatura wygrzewania (czas: 1h)			
			-	200°C	250°C	300°C
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	35,8	37,4	32,6	40,2
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427	°C	54,9	55,4	55,3	53,3
Lepkość dynamiczna, 60°C	PN-EN 13302	Pa·s	D ¹	D ¹	D ¹	D ¹
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302	Pa·s	21,5	20,35	19,71	16,59
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	3,68	3,71	3,73	3,06
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	0,75	0,75	0,74	0,65

(¹) - brak możliwości dokonania pomiaru



Rys. 4-24. Indeks zmiany konsystencji (penetracja, T PiK) asfaltu 35/50+2,0% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza



Rys. 4-25. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu 35/50+2,0% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

Na podstawie analizy wyników badań zmian konsystencji lepiszczu asfaltowych i lepkości zestawionych w tabl. 4-5 do 4-16 i na rys. 4-2 do 4-25 można stwierdzić, że:

1. Asfalty drogowe rodzaju 50/70, 35/50 i 20/30 pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury wykazują nieznaczne zmiany indeksu konsystencji od 3 do 12%. Indeks stwardnienia asfaltu 20/30 i 50/70 wykazuje zmniejszenie a w przypadku asfaltu 35/50 wykazuje wzrost indeksu, co jest spowodowane zmianą w budowie koloidalnej spowodowaną wysoką temperaturą.
2. Polimeroasfalty pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury wykazują nieznaczne zmiany indeksu konsystencji w temperaturze 200 i 250, natomiast w temperaturze 300 indeks zmian konsystencji i indeks stwardnienia wykazują bardzo duże zmiany. Następuje wyraźne obniżenie twardości i zmniejszenie lepkości, co jest spowodowane zniszczeniem struktury polimeru.
3. Dodatek asfaltu naturalnego do asfaltów drogowych wpływa korzystnie na indeks stwardnienia i indeks zmiany konsystencji asfaltu 50/70 modyfikowanego dodatkami asfaltu naturalnego w ilości 1, 1,5 i 2% i wygrzewanego w temperaturach 200, 250 i 300. W przypadku dodatku asfaltu naturalnego do asfaltu rodzaju 35/50 obserwuje się nieznaczne zmiany konsystencji w funkcji temperatury i ilości dodatku, natomiast indeks stwardnienia wykazuje zależność od ilości dodatku asfaltu naturalnego. Większe zmiany indeksu stwardnienia obserwuje się przy małej ilości dodatku asfaltu (1%). Najmniejsze zmiany indeksu stwardnienia w funkcji temperatury obserwuje się przy dodatku 2% asfaltu naturalnego, co pozwala na stwierdzenie, że dodatek asfaltu naturalnego stabilizuje wartości lepkości asfaltów wygrzewanych w różnych temperaturach.

4.2 Badania odporności papy stosowanej do wykonywania izolacji mostowej na oddziaływanie wysokiej temperatury technologicznej

Papy termozgrzewalne są układem warstwowym składającym się z osnowy z włókniny technicznej, przesyconej i obustronnie powleczonej polimeroasfaltem i z naniesioną na górnej powierzchni, posypką mineralną. Izolację pomostu obiektu mostowego wykonuje się przez przyklejenie arkuszy papy na przygotowanym i zagruntowanym podłożu w jednej lub w dwu warstwach. Grubość papy w układzie jednowarstwowym powinna wynosić minimum 5 mm [8].

Układanie pap termozgrzewalnych jako izolacji na obiektach mostowych wymaga podgrzania masy powłokowej papy, w tak nieznacznym stopniu, by nastąpiło trwałe połączenie zagruntowanego podłoża z papą. Izolacje wykonywane z pap termozgrzewalnych mogą być łatwo uszkodzone (zniszczone) podczas układania przez przegrzanie masy powłokowej płomieniem palnika. Należy mieć na uwadze, że temperatura płomienia przy wylocie palnika osiąga wartość około 1000°C i wymaga to prowadzenia procesu podgrzewania z odpowiedniej odległości. Przegrzanie masy powłokowej niszczy przestrzenne wiązania polimerowe, których istnienie gwarantuje dobre właściwości polimeroasfaltu. W wyniku tego procesu następuje zmniejszenie się wielkości molekularnej polimerów i pogorszenie ich właściwości sprężystych [10].

W realizowanej pracy badaniom poddane zostały dwa rodzaje papy zgrzewalnej przewidzianej do wykonania izolacji pomostu, wyprodukowane przez dwóch różnych producentów, oznaczonych odpowiednio numerami 1 i 2.

4.2.1 Wymagania odnośnie asfaltowych pap zgrzewalnych

W tabl. 4-17 przedstawiono łącznie wymagania, dla obydwu badanych pap mostowych na podstawie Aprobat Technicznych Instytutu Badawczego Dróg i Mostów. W przypadku różnicy w wymaganiach podano obydwie wartości.

Tablica 4-17. Wymagania odnośnie analizowanych pap zgrzewalnych do izolacji mostowych

Właściwość	Jednostka	Wymaganie	Metoda badań
Wygląd zewnętrzny	-	Arkusz papy powinien być bez dziur, załamania i o równych krawędziach. Papa powinna mieć równomiernie rozłożoną powłokę i posypkę. Niedopuszczalne są uszkodzenia powstałe przy rozwijaniu rolki na skutek sklejenia papy.	PN-B-04615 [N44]
Długość arkusza	cm	500; 750; 1000 ($\pm 1\%$)	PN-B-04615
Szerokość arkusza	cm	100 ($\pm 1\%$) i 100 ($\pm 2\%$)*	PN-B-04615
Grubość arkusza	mm	$\geq 5,0$	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/1 [40]
Grubość warstwy izolacyjnej pod osnową	mm	$\geq 3,0$	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/2 [41]
Giętkość, badana na wałku $\varnothing 30$ mm	$^{\circ}\text{C}$	≤ -20	PN-B-04615 [N44] PN-EN 1109 [N7]
Prześlakliwość wg IBDiM	MPa	$\geq 0,5$, $\geq 0,8^*$	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/3 [42]
Siła zrywająca przy rozciąganiu ¹⁾ : - wzdłuż arkusza - w poprzek arkusza	N N	≥ 800 , $\geq 1000^*$, $\geq 1100^*$ ≥ 600 , $\geq 800^*$, $\geq 850^*$	PN-EN 12311-1 [N39]
Wydłużenie przy zerwaniu ¹⁾ : - wzdłuż arkusza - w poprzek arkusza	% %	≥ 30 , $\geq 50^*$ ≥ 30 , $\geq 50^*$, $\geq 55^*$	PN-EN 12311-1
Siła zrywająca przy rozdzielaniu ¹⁾ : - wzdłuż arkusza - w poprzek arkusza	N N	≥ 150 , $\geq 270^*$, $\geq 300^*$ ≥ 150 , $\geq 250^*$	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/4 [43]
Siła zrywająca styki arkuszy papy	N	≥ 500 , $\geq 700^*$	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/9 [44]
Przyczepność do podłoża metodą „pull off”	MPa	$\geq 0,5$	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/5 [45]
Odporność na działanie podwyższonej temperatury przez 2h	$^{\circ}\text{C}$	≥ 100	PN-B-04615
* wartości deklarowane przez producentów pap mostowych			
¹⁾ Oznaczenie papy wykonać w temperaturze $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$			

4.2.2 Materiały do badań

Do oceny wpływu oddziaływania wysokiej temperatury na izolacyjne materiały arkuszowe wybrano papę zgrzewalną powszechnie stosowaną w Polsce na obiektach mostowych a także nowy rodzaj mostowej papy izolacyjnej, wprowadzony ostatnio na polski rynek.

Wybrane do badań papy termozgrzewalne przedstawiono w tabl. 4-18.

Tablica 4-18. Materiały arkuszowe do izolacji mostowych

Rodzaj papy	Rodzaj warstw	Symbol próbki
Papa asfaltowa zgrzewalna, jednowarstwowa	Osnowa z włókniny poliestrowej obustronnie przesycona i powleczona asfaltem modyfikowanym SBS, posypka mineralna, folia antyadhezyjna	Papa mostowa nr 1
Papa asfaltowa zgrzewalna, jednowarstwowa	Osnowa z włókniny poliestrowej obustronnie przesycona i powleczona asfaltem modyfikowanym SBS, posypka mineralna, folia antyadhezyjna	Papa mostowa nr 2

4.2.3 Program badań pap zgrzewalnych

Papy zgrzewalne stosowane do izolacji mostowych, podczas układania są narażone na krótkotrwałe, oddziaływanie wysokich temperatur w procesie nadtapiania palnikiem masy powłokowej na spodzie papy. Dodatkowo, izolacja jest ponownie rozgrzewana po ułożeniu na jej powierzchni gorącej warstwy ochronnej o temperaturze 160-230°C. Ze względu na to, że lepiszcze wchodzące w skład papy zgrzewalnej jest modyfikowane polimerami, dopuszczalne jest krótkotrwałe oddziaływanie wysokiej temperatury około 200°C (dopuszczalne jest 2 - 3 godzinne działanie temperatur 220 – 230°C). Oddziaływanie wysokich temperatur powyżej 200°C może powodować rozkład polimeru w papie i zmianę właściwości lepkosprężystych modyfikowanego lepiszcza.

Pomost obiektu mostowego wraz z nawierzchnią narażony jest, w ciągu całego roku, na szybkie schładzanie w okresie zimowym i nagrzewanie w okresie lata. Przyjmuje się, że w okresie zimowym minimalna temperatura może wynosić - 30°C a w okresie letnim nawierzchnia może nagrzewać się do temperatury 70°C.

W wyniku rozgrzewania masy powłokowej oraz oddziaływania wysokiej temperatury warstwy ochronnej układanej na izolacji może zachodzić zmiana lepkosprężystych właściwości lepiszcza wchodzącego w skład papy stosowanej do izolacji. Próbki pap nr 1 i nr 2 poddano oddziaływaniu wysokiej temperatury technologicznej, przyjmując trzy temperatury wygrzewania: 200, 250 i 300°C. Czas wygrzewania wynosił 1 godzinę.

Po procesie wygrzewania badane próbki pap mostowych poddano badaniu giętkości w temperaturze -30°C wg PN-EN 1109:2010 pkt 9.1. [N7].

4.2.4 Wyniki badań pap zgrzewalnych

Wyniki badań właściwości pap mostowych nr 1 i 2 nie wygrzewanych (oryginalnych) oraz wygrzewanych w temperaturze 200, 250 i 300°C przedstawiono w tabl. 4-19 i 4-20. Zmiany powierzchni próbek po procesie wygrzewania pokazano na rys. 4-26 do 4-33. W wyniku oddziaływania wysokiej temperatury papy uległy degradacji. Posypka mineralna przemieściła się w kierunku osnowy, na powierzchni, w warstwie polimeroasfaltu, wystąpiły liczne pęcherze i nierówności. Wizualny efekt wygrzewania pap nr 1 i 2 jest identyczny.



Rys. 4-26. Papa mostowa przed wygrzewaniem



Rys. 4-27. Papa mostowa przed wygrzewaniem



Rys. 4-28. Papa mostowa wygrzewana przez 1 godzinę w temperaturze 200°C



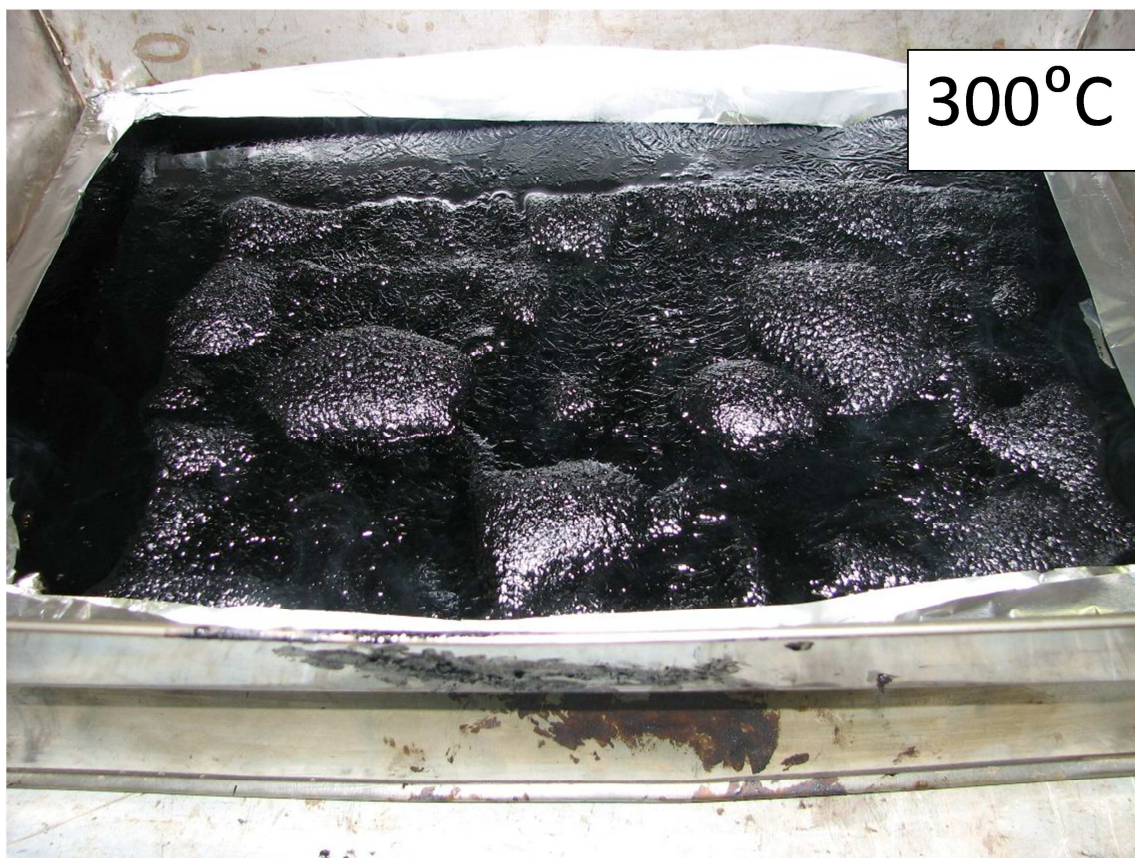
Rys. 4-29. Papa mostowa wygrzewana przez 1 godzinę w temperaturze 200°C



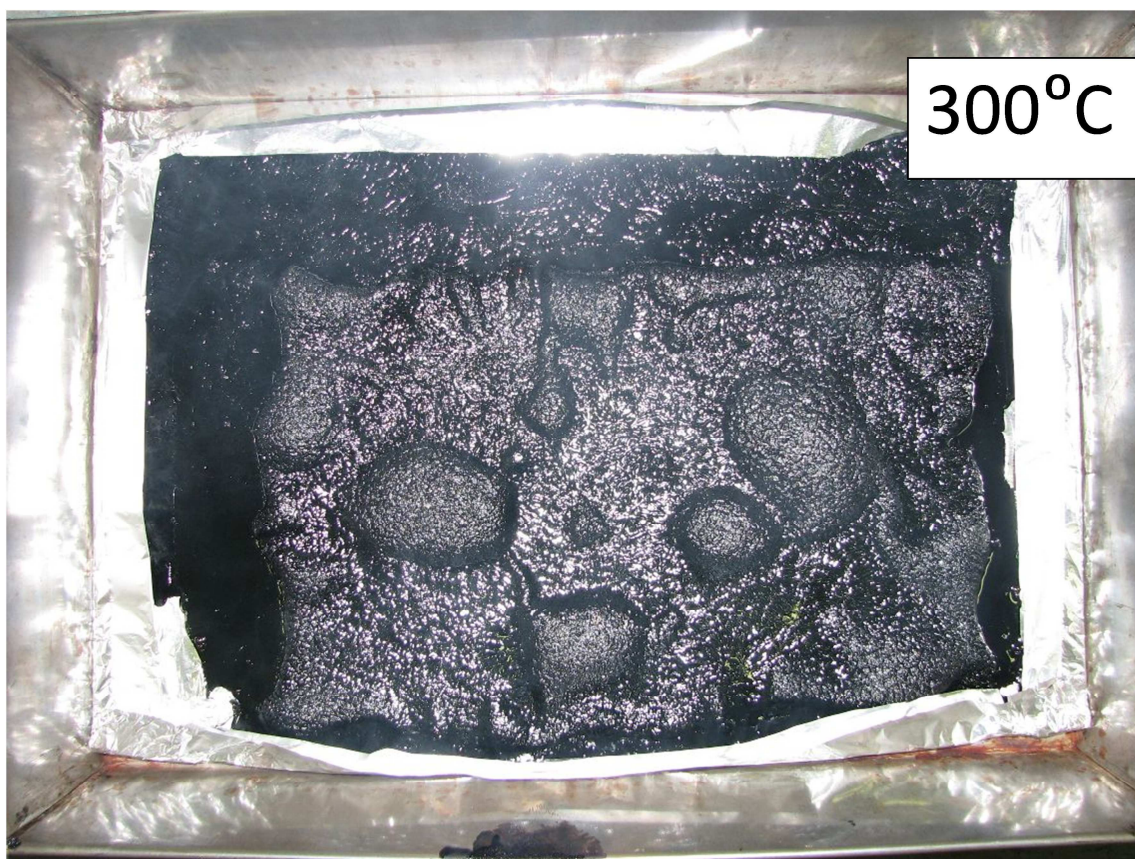
Rys. 4-30. Papa mostowa wygrzewana przez 1 godzinę w temperaturze 250°C



Rys. 4-31. Papa mostowa wygrzewana przez 1 godzinę w temperaturze 250°C



Rys. 4-32. Papa mostowa wygrzewana przez 1 godzinę w temperaturze 300°C



Rys. 4-33. Papa mostowa wygrzewana przez 1 godzinę w temperaturze 300°C

Tablica 4-19. Wyniki badania giętkości papy nr 1 w funkcji wygrzewania

Lp.	Właściwość	Wyniki badania	Metodyka wg
1	Giętkość w temperaturze -30°C, wzdłuż Wynik badania:	Powierzchnia górna pęka; pęka; pęka; pęka; nie pęka	PN-EN 1109:2001, pkt 9.1 [N7]; średnica trzpienia zginającego Ø 30mm
		negatywny ¹⁾	
2	Giętkość w temperaturze -30°C, wzdłuż - próbki po wygrzewaniu w temperaturze 200°C Wynik badania:	Powierzchnia górna pęka; pęka; pęka; pęka; pęka	PN-EN 1109:2001, pkt 9.1; średnica trzpienia zginającego Ø 30mm
		negatywny ²⁾	
3	Giętkość w temperaturze -30°C, wzdłuż - próbki po wygrzewaniu w temperaturze 250°C Wynik badania:	Powierzchnia górna pęka; pęka; pęka; pęka; pęka	PN-EN 1109:2001, pkt 9.1; średnica trzpienia zginającego Ø 30mm
		negatywny ³⁾	
4	Giętkość w temperaturze -30°C, wzdłuż - próbki po wygrzewaniu w temperaturze 300°C Wynik badania:	Powierzchnia górna pęka; pęka; pęka; pęka; pęka	PN-EN 1109:2001, pkt 9.1; średnica trzpienia zginającego Ø 30mm
		negatywny ⁴⁾	

Inne informacje dotyczące obiektu badań:

- 1) Włoskowate pęknięcia wierzchniej warstwy masy powłokowej
- 2) Pęknięcie wierzchniej warstwy masy powłokowej do powierzchni osnowy
- 3) Pęknięcie papy na całej grubości (masy powłokowej i osnowy)
- 4) Pęknięcie papy na całej grubości (masy powłokowej i osnowy)

Tablica 4-20. Wyniki badania giętkości papy nr 2 w funkcji wygrzewania

Lp.	Właściwość	Wyniki badania	Metodyka wg
1	Giętkość w temperaturze -30°C, wzdłuż Wynik badania:	Powierzchnia górna pęka; pęka; pęka; pęka; pęka	PN-EN 1109:2001, pkt 9.1 [N7]; średnica trzpienia zginającego Ø 30mm
		negatywny ¹⁾	
2	Giętkość w temperaturze -30°C, wzdłuż - próbki po wygrzewaniu w temperaturze 200°C Wynik badania:	Powierzchnia górna Pęka; pęka; pęka; pęka; pęka	PN-EN 1109:2001, pkt 9.1; średnica trzpienia zginającego Ø 30mm
		negatywny ²⁾	
3	Giętkość w temperaturze -30°C, wzdłuż - próbki po wygrzewaniu w temperaturze 250°C Wynik badania:	Powierzchnia górna pęka; pęka; pęka; pęka; pęka	PN-EN 1109:2001, pkt 9.1; średnica trzpienia zginającego Ø 30mm
		negatywny ³⁾	
4	Giętkość w temperaturze -30°C, wzdłuż - próbki po wygrzewaniu w temperaturze 300°C Wynik badania:	Powierzchnia górna pęka; pęka; pęka; pęka; pęka	PN-EN 1109:2001, pkt 9.1; średnica trzpienia zginającego Ø 30mm
		negatywny ⁴⁾	

Inne informacje dotyczące obiektu badań:

- 5) Włoskowate pęknięcia wierzchniej warstwy masy powłokowej
- 6) Pęknięcie wierzchniej warstwy masy powłokowej do powierzchni osnowy
- 7) Pęknięcie papy na całej grubości (masy powłokowej i osnowy)
- 8) Pęknięcie papy na całej grubości (masy powłokowej i osnowy)

Ze względu na to, że w okresie zimowym konstrukcja pomostu oraz nawierzchnia mostowa poddawana jest oddziaływaniu temperatury do -30°C , dla pap oryginalnych i wygrzewanych przyjęto badanie giętkości w temperaturze -30°C w celu sprawdzenia, czy papy w tej temperaturze nie tracą swych właściwości lepkosprężystych.

Wyniki badania giętkości pap zgrzewalnych wykazały, że papy przed wygrzewaniem (oryginalne) ale również papy po wygrzewaniu już w temperaturze 200°C ulegają zniszczeniom. Powierzchnia górna pap oryginalnych wykazuje włoskowate pęknięcia wierzchniej warstwy masy powłokowej po badaniu giętkości. Natomiast papy po wygrzewaniu w temperaturze 200°C wykazują pęknięcia wierzchniej warstwy masy powłokowej do powierzchni osnowy. Papy wygrzewane w temperaturze 250 i 300°C po badaniu giętkości w temperaturze -30°C wykazują pęknięcia papy na całej grubości masy powłokowej i osnowy.

4.3 Badanie odporności na wysokie temperatury technologiczne izolacji z asfaltu lanego, mastyksu tradycyjnego, mastyksu ze zwiększoną zawartością frakcji grysowej oraz nawierzchni z betonu asfaltowego i mastyksu grysowego SMA

W celu określenia wpływu wysokiej temperatury na właściwości funkcjonalne izolacji i nawierzchni mostowej przeprowadzono badania wybranych mieszanek mineralno-asfaltowych. Ocenie poddano izolację z mastyksu tradycyjnego, asfaltu lanego (MA) oraz z mastyksu o zwiększonej zawartości frakcji grysowej (MA/SMA). Zaprojektowano mieszanki mineralno-asfaltowe do ruchu ciężkiego KR3-KR6.

4.3.1 Izolacja z asfaltu lanego (MA)

Zaprojektowano mieszankę mineralno-asfaltową typu asfalt lany (MA) o uziarnieniu 5 i 8 mm (MA 5 i MA 8) kategorii ruchu KR3-KR6 zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1].

Wymagania odnośnie asfaltu lanego MA

Wymagania dotyczące mieszanek mineralno-asfaltowych typu asfalt lany określa norma PN-EN 13108-6 [N8], w której są podane podstawowe klasyfikacyjne wymagania (tabl. 4-22). Uziarnienie mieszanek mineralnych do asfaltu lanego wg WT-2 [N1] przedstawiono w tabl. 4-21.

Tablica 4-21. Uziarnienie mieszanki mineralnej i zawartość lepiszcza do asfaltu lanego MA do warstwy ściernalnej lub wiążącej wg WT-2:2010

Właściwość	Przesiew, [% (m/m)]					
	MA 5 KR1÷6		MA 8 KR1÷6		MA 11 KR1÷6	
Wymiar sita #, [mm]	od	do	od	do	od	do
16	-	-	-	-	100	-
11,2	-	-	100	-	90	100
8	100	-	90	100	70	85
5,6	90	100	70	90	-	-
2	55	65	50	60	45	55
0,125	27	42	25	40	22	35
0,063	24,0	32,0	22,0	30,0	20,0	28,0
Zawartość lepiszcza	$B_{\min 6,8}$		$B_{\min 6,8}$		$B_{\min 6,5}$	

Tablica 4-22. Wymagane właściwości asfaltu lanego MA wg WT-2:2010

Właściwość	Metoda badania	Wymaganie w zależności od kategorii ruchu	
		KR1÷2	KR3÷6
Odporność na deformacje trwałe	PN-EN 13108-20 (D.5.1) [N9]	$I_{\min} 1,0$ $I_{\max} 4,0$ $I_{nc} 0,6$	$I_{\min} 1,0$ $I_{\max} 3,0$ $I_{nc0,4}$

Materiały

Do mieszanek mineralno-asfaltowych typu asfalt lany zastosowano następujące materiały:

- wypełniacz dodany - mączka wapienna Wolica,
- piasek niełamany frakcji 0,063/2,
- piasek łamany frakcji 0/0,063 mm, z otoczków Rudno,
- grys frakcji 2/5 mm, gabro Słupiec,
- grys frakcji 5/8 mm, gabro Słupiec,
- lepiszcza:
 - PmB 25/55-60,
 - 20/30,
 - 35/50,
 - 35/50 + 2,0% (m/m) asfaltu naturalnego.

Badania materiałów kamiennych – uziarnienie

W celu ustalenia optymalnego składu mieszanki mineralnej wykonano oznaczenie składu ziarnowego materiałów kamiennych zgodnie z normą PN-EN 933-1 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania” [N10]. Poszczególne kruszywa przesiewano przez normowy zestaw sit (zestaw podstawowy +1), metodą „na sucho”. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego poszczególnych kruszyw przedstawiono w tabl. 4-23.

Tablica 4-23. Skład ziarnowy materiałów kamiennych do asfaltu lanego MA

Wymiar boku kwadratowego oczka sita [mm]	Zawartość ziaren pozostających na sicie [%]				
	Mączka wapienna Wolica	Piasek niełamany 0,063/2	Piasek łamany z otoczków Rudno 0,063/2	Grys gablo Słupiec 2/5	Grys gablo Słupiec 5/8
45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
8,0	0,0	0,0	0,1	0,0	8,9
5,6	0,0	0,5	0,3	5,5	65,3
4,0	0,0	0,3	0,2	42,5	20,0
2,0	0,0	1,0	1,1	45,6	3,4
1,0	0,0	5,9	17,6	4,4	0,9
0,5	0,0	32,1	43,5	0,9	0,1
0,25	0,0	51,0	28,3	0,2	0,1
0,125	2,7	7,6	6,8	0,2	0,2
0,063	18,6	0,5	1,5	0,7	0,5
< 0,063	78,7	1,0	0,6	0,0	0,0
Σ	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Uziarnienie wypełniacza mieści się w granicach wymagań od 70 – 100% ziaren przechodzących przez sito 0,063 mm. Piaski oraz grysy mają uziarnienia w granicach nie przekraczających wymagań wg WT-1:2010 [N11] dotyczących asfaltów lanych.

Badania materiałów kamiennych – gęstość

Oznaczenie gęstości materiałów kamiennych zostało wykonane metodą piknometryczną wg PN-EN 1097-6 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw”. Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości” [N12] i PN-EN 1097-7 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna” [N13]. Metoda polega na obliczeniu ilorazu masy ziaren i ich objętości, określonej za pomocą piknometru. Wyniki oznaczenia przedstawia tabl. 4-24.

Tablica 4-24. Gęstości kruszyw i wypełniacza

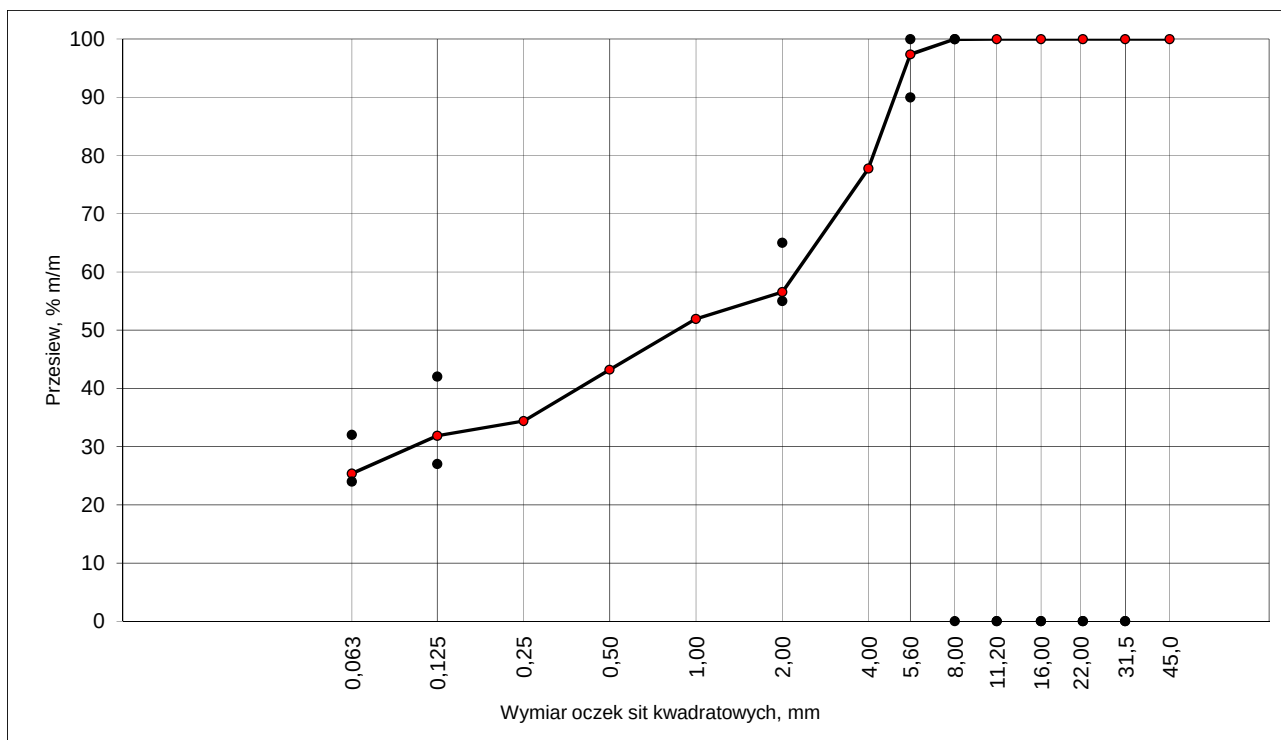
Rodzaj kruszywa	Gęstość, [g/cm ³]
Grys gąbry Słupiec 5/8	2,972
Grys gąbry Słupiec 2/5	2,994
Piasek łamany z otoczków Rudno	2,703
Piasek niełamany	2,657
Mączka wapienna Wolica	2,710

Gęstość kruszyw wykorzystano do ustalania współczynnika korygującego zawartość lepiszcza wg WT-2: 2010 [N1].

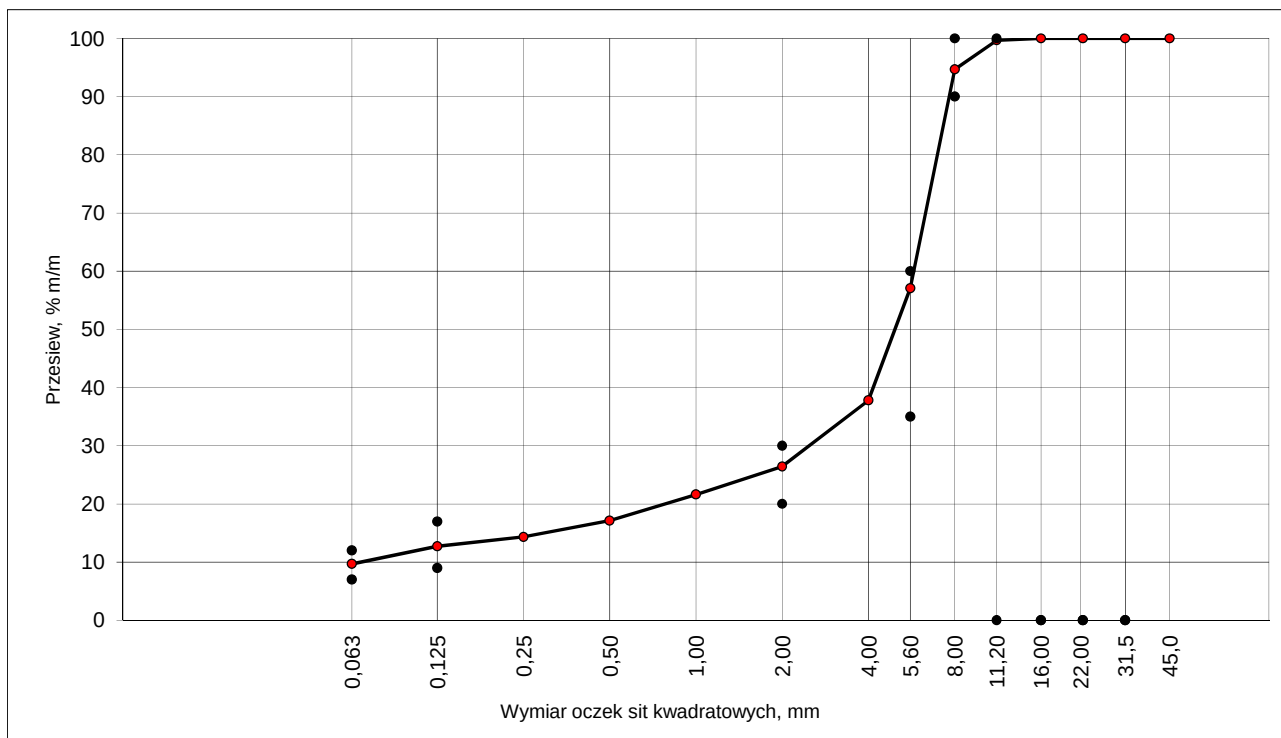
Ustalenie składu mieszanki mineralno-asfaltowej asfalt lany

Mieszankę mineralno-asfaltową typu asfalt lany zaprojektowano zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1]. Zaprojektowano 4 rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych typu MA 5 i MA 8, zróżnicowanych pod względem rodzaju lepiszcza, wykorzystując uziarnienie mieszanki mineralnej i zawartość lepiszcza dla asfaltu lanego do warstwy ścieralnej i wiążącej kategorii ruchu KR1 do KR6.

Krzywe uziarnienia zaprojektowanych mieszanek mineralnych do asfaltu lanego MA 5 i MA 8 przedstawiono odpowiednio na rys. 4-34 i 4-35. Ostateczny skład mieszanek mineralno-asfaltowych typu asfalt lany MA 5 i MA 8 przedstawiono w tabl. 4-25.



Rys. 4-34. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej do asfaltu lanego MA 5



Rys. 4-35. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej do asfaltu lanego MA 8

Krzywe uziarnienia MA 5 i MA 8 mieszczą się między punktami kontrolnymi. Skład ziarnowy MA projektowano z uwzględnieniem zwiększonej odporności na odkształcenia trwałe.

Tablica 4-25. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej (mma) typu MA 5 i MA 8

Składniki	Skład mma typu MA 5 [%]	Skład mma typu MA 8 [%]
Lepiszczce	8,0	8,0
Mączka wapienna Wolica	29,4	27,6
Piasek niełamany	10,1	-
Piasek łamany z otoczków Rudno	10,1	22,1
Grys gabro Słupiec 2/5	42,3	18,4
Grys gabro Słupiec 5/8	-	23,9
	100,0	100,0

Do mieszanek asfaltu lanego zastosowano twarde asfalty drogowe oraz polimeroasfalty. Ze względu na urabialność mieszanki, konieczne było zwiększenie dla wszystkich rodzajów asfaltu lanego zawartości lepiszcza do 8% (m/m). Ponadto, w celu poprawy urabialności mieszanki MA 5 zastosowano piasek niełamany w ilości 10,1% (m/m).

Program badań asfaltu lanego

Mieszanki mineralno-asfaltowe stosowane do wykonywania izolacji mostowych, podczas produkcji, transportu i układania mogą być narażone na oddziaływanie wysokich temperatur, przewyższających temperatury wymagane procesami technologicznymi. Dodatkowo, izolacja z mma (np. mastyks, asfalt lany) jest ponownie rozgrzewana po ułożeniu na jej powierzchni gorącej warstwy ochronnej o temperaturze 160-230°C. Oddziaływanie wysokiej temperatury powyżej 200°C może powodować zmianę właściwości lepiszczy a tym samym zmianę właściwości lepkosprężystych mieszanek mineralno-asfaltowych.

W celu określenia odporności na wysokie temperatury przy wytwarzaniu, transporcie i układaniu mieszanek mineralno-asfaltowych, luźną mieszankę asfaltu lanego (MA) poddano wygrzewaniu w temperaturze: 200, 250 i 300°C w warstwie około 50 mm. Czas wygrzewania wynosił 1 godzinę. Po procesie wygrzewania zaformowano próbki sześciennie 70×70 mm i próbki cylindryczne Marshalla Ø 100 mm zgodnie z PN-EN 12697-20 [N14]. Próbki Marshalla do badań penetracji stemplem przedstawiono na rys. 4-36.

Próbki asfaltu lanego zostały wykonane z polimeroasfaltem PmB 25/55-60, asfaltem drogowym 20/30 i 35/50 oraz asfaltem 35/50 z 2% dodatkiem asfaltu naturalnego Trinidad.



Rys. 4-36. Próbkę asfaltu lanego MA 8 nie wygrzewane oraz po wygrzewaniu w temperaturze 200 i 250°C przygotowane do badań

W celu oceny zmian właściwości asfaltu lanego pod wpływem wysokiej temperatury 200, 250 i 300 °C wykonano badania penetracji stemplem (twardości) oraz badania modułu sztywności próbek MA nie wygrzewanych oraz poddanych wygrzewaniu.

Szczegółowy program badań asfaltu lanego do izolacji mostowych przedstawiono poniżej:

- pomiar penetracji stemplem w temperaturze 40°C wg PN-EN 12697-20 [N14],
- pomiar modułu sztywności w rozciąganiu pośrednim w temperaturze 10°C, metoda IT-CY wg PN-EN 12697-26 [N15].

Na rys. 4-37 przedstawiono aparaturę do pomiaru penetracji stemplem (twardości) asfaltu lanego oraz mastyksów. Na rys. 4-38 przedstawiono uniwersalną maszynę wytrzymałościową o napędzie hydraulicznym do badania modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych.



Rys. 4-37. Penetrometr dwustanowiskowy do badania twardości asfaltu lanego i mastyksu tradycyjnego



Rys. 4-38. Uniwersalna hydrauliczna maszyna wytrzymałościowa do badania modułu sztywności mma

Badanie penetracji stemplem służy do oceny odporności warstwy wykonanej z mieszanki mineralno-asfaltowej na deformacje trwałe w temperaturze 40°C. Temperatura ta odpowiada letnim warunkom użytkowym nawierzchni. Badanie polega na wyznaczeniu głębokości zagłębienia w asfalcie lanym lub w mastyksie tradycyjnym, cylindrycznego wgłębnika (trzcienia) o okrągłej, płasko zakończonej podstawie, o powierzchni 500 mm², pod działaniem siły 525 N. Czas obciążenia wynosi do 60 minut. Badania wykonano na próbkach walcowych i sześciennych, skrępowanych bocznie, przez umieszczenie ich w cylindrycznych formach Marshalla lub w sześciennych formach o wymiarach 70×70 mm.

Badanie modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej pozwala ocenić właściwości lepkosprężyste warstwy nawierzchni. Zgodnie z metodą IT-CY próbka mma jest odkształcana w liniowym zakresie lepkosprężystości pod powtarzalnym obciążeniem. Mierzona jest amplituda naprężeń i odkształceń jednocześnie z przesunięciem fazowym pomiędzy naprężeniem a odkształceniem [6]. Badania przeprowadzono w temperaturze 10°C, co odpowiada temperaturze w średnich warunkach użytkowych nawierzchni a badana próbka pozostaje w stanie lepkosprężystym.

Wyniki badań asfaltu lanego

Wyniki badań właściwości asfaltu lanego do izolacji mostowych niewygrzewanego (oryginalnego) oraz wygrzewanego w temperaturze 200, 250 i 300°C przedstawiono w tabl. 4-26 i 4-29.

Zmiany powierzchni próbek po procesie wygrzewania pokazano na rys. 4-39 do 4-41.

Na rys. 4-42 i 4.43 przedstawiono w formie graficznej indeksy zmiany twardości asfaltu lanego (IS) określone na podstawie pomiarów penetracji stemplem a na rys. 4-44 i 4-45 indeksy zmiany modułu sztywności w funkcji temperatury wygrzewania 200, 250 i 300°C.

Indeks zmiany twardości (IS pen. stemplem) obliczono na podstawie wzoru:

$$IS_{pen. stemplem} = \frac{PS30(200; 250; 300^{\circ}C)}{PS30} \quad (9)$$

gdzie:

$PS30(200; 250; 300^{\circ}C)$ – penetracja stemplem po wygrzewaniu w temp. 200, 250, 300°C określona po 30 minutach badania, [mm],

$PS30$ – penetracja stemplem przed wygrzewaniem określona po 30 minutach badania, [mm].

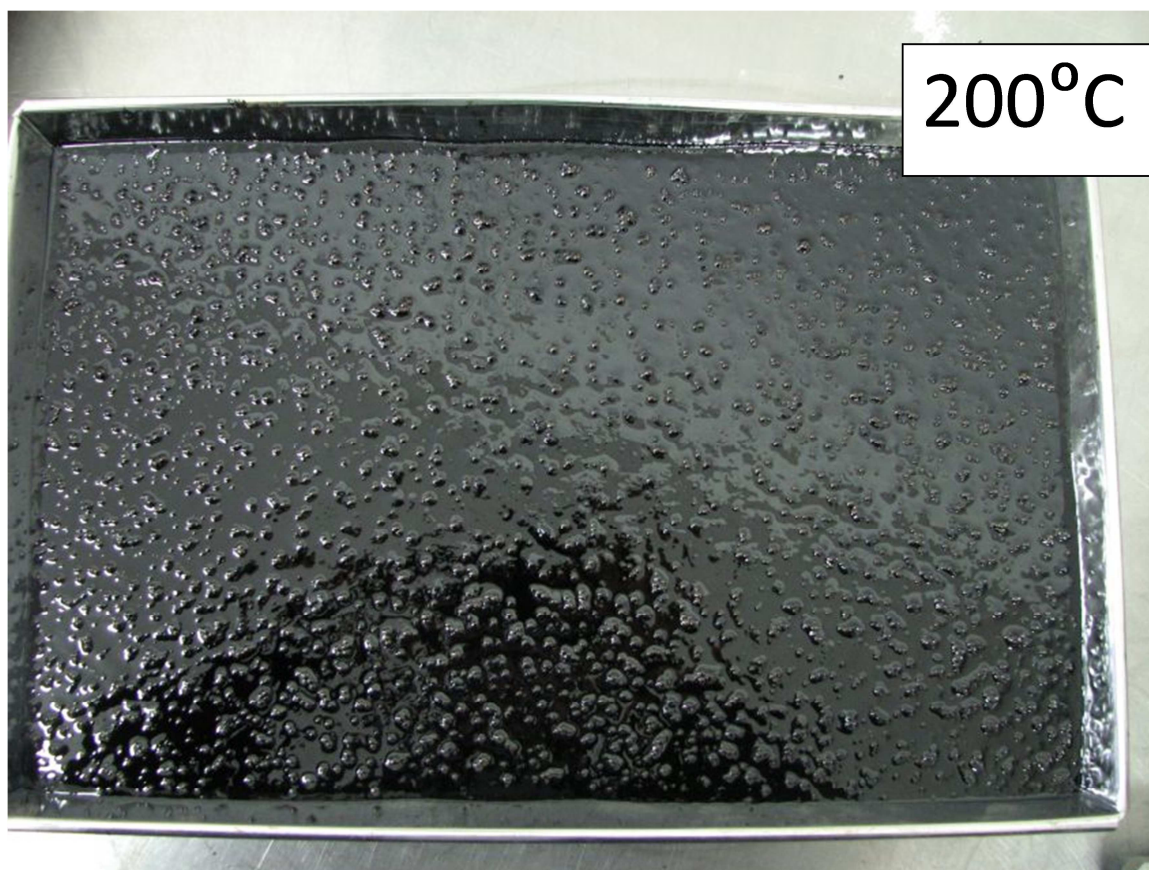
Indeks zmiany modułu sztywności (IS modułu szt.) obliczono na podstawie wzoru:

$$IS_{modułu szt.} = \frac{MS10(200; 250; 300^{\circ}C)}{MS10} \quad (10)$$

gdzie:

$MS10(200; 250; 300^{\circ}C)$ – moduł sztywności po wygrzewaniu w temp. 200, 250, 300°C, określony w temp. 10°C, [MPa]

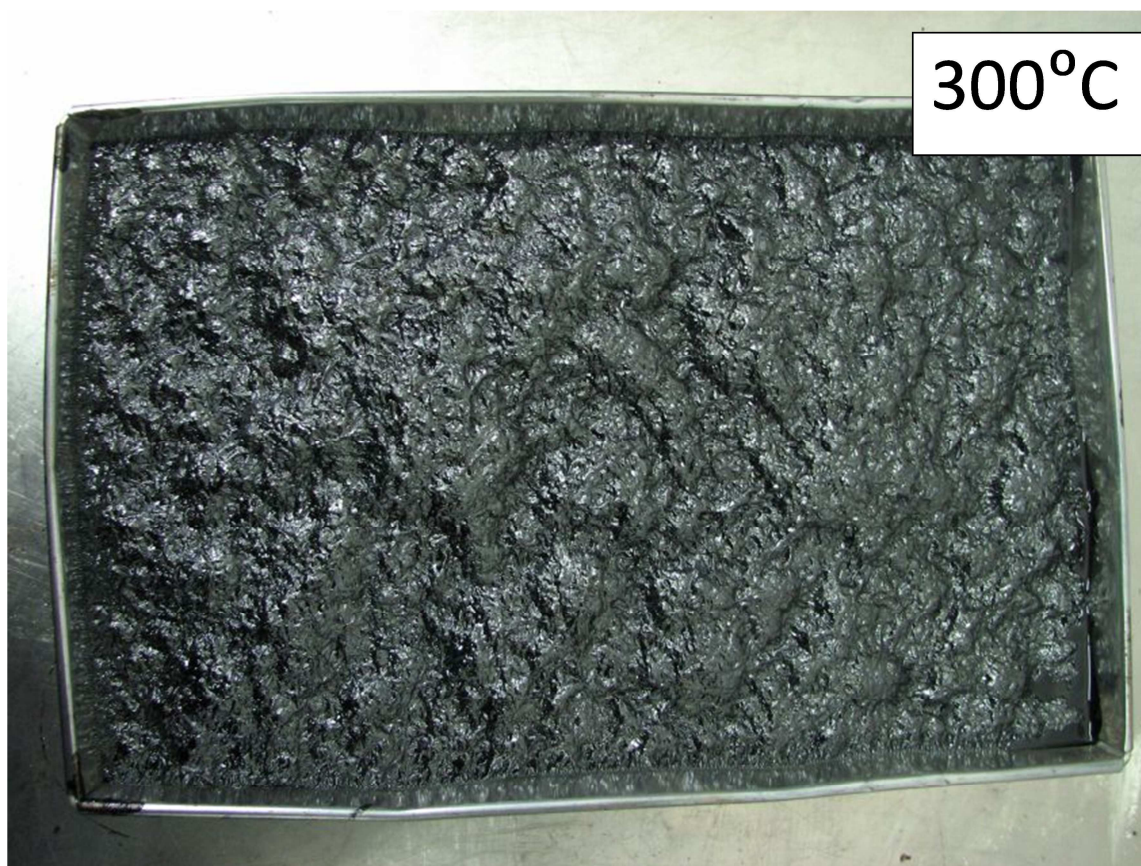
$MS10$ – moduł sztywności przed wygrzewaniem, określony w temp. 10°C, [MPa].



Rys. 4-39. Asfalt lany wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 200°C



Rys. 4-40. Asfalt lany wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 250°C



Rys. 4-41. Asfalt lany wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 300°C

Na podstawie oceny wizualnej zmiany powierzchni próbek asfaltu lanego z polimeroasfaltem PmB 25/55-60 poddanych wygrzewaniu przez 1 godzinę, w temperaturach 200°C, 250°C i 300°C można stwierdzić:

- po wygrzewaniu w temperaturze 200°C powierzchnia asfaltu lanego jest jednorodna, błyszcząca z wyraźnie widocznymi cząstkami kruszywa otoczonymi lepiskiem. W temperaturze tej struktura polimeroasfaltu nie ulega zniszczeniu. Taka powierzchnia asfaltu lanego jest charakterystyczna prawidłowo wykonanych warstw asfaltu lanego;

- po wygrzewaniu w temperaturze 250°C powierzchnia asfaltu lanego jest jednorodna z bardziej widocznymi ziarnami kruszywa. W temperaturze tej może następować jednak zniszczenie sieci polimerowej, lepisko upływnia się;

- po wygrzewaniu w temperaturze 300°C powierzchnia asfaltu lanego uległa znacznemu zniekształceniu, wystąpiły liczne nierówności w postaci sfalowań i pęcherzy. W tej temperaturze nastąpiła prawdopodobnie całkowita degradacja sieci polimerowej w lepisku.

Obserwacja przekroju płyty wykonanej z asfaltu lanego poddanego wygrzewaniu w temperaturze 300°C stwierdzono, że składniki mieszanki asfaltu lanego uległy rozsegregowaniu.

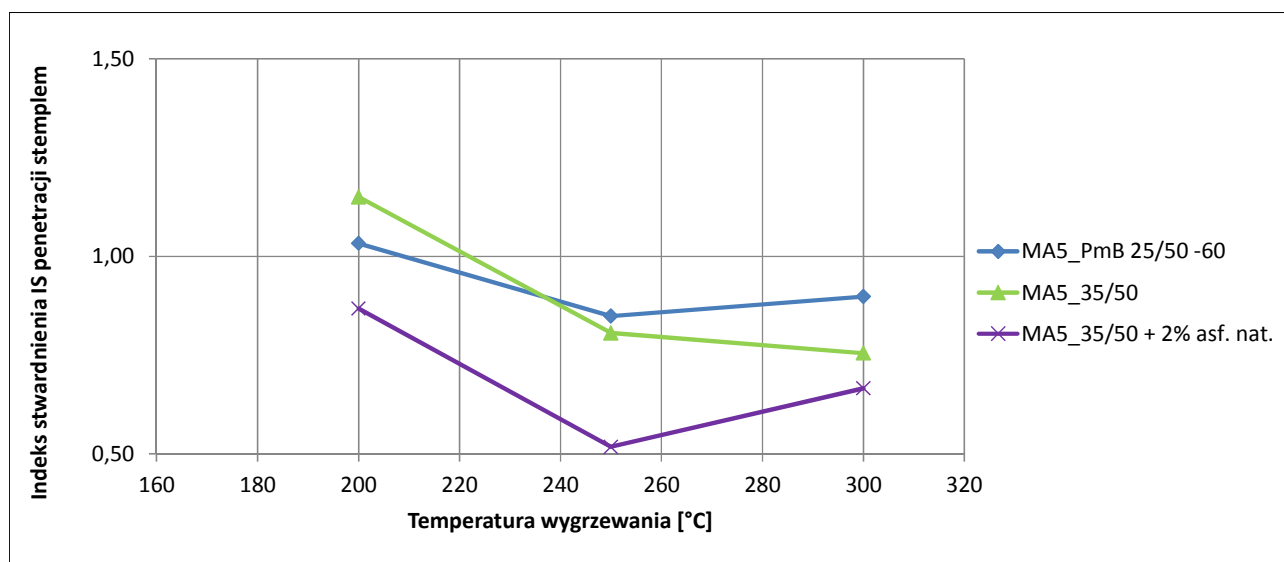
Mieszanka asfaltu lanego (po wygrzewaniu) do wykonania próbek do badań penetracji stemplem i modułu sztywności została przed zaformowaniem ujednoliconą.

Wyniki badania penetracji stemplem przedstawiono w tabl. 4-26 i 4-27 oraz na rys. 4-42 i 4-43.

Tablica 4-26. Wyniki badań penetracji stemplem asfaltu lanego MA 5 do izolacji mostowych

Rodzaj lepiska w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Zagłębienie trzpienia w [mm] odczytane po czasie badania:						
			1 minuta	2 minuta	4 minuta	8 minuta	15 minuta	30 minuta	60 minuta
PmB 25/55-60	MA5_X	-	1,42	1,67	1,94	2,30	2,64	3,04	3,49
	MA5_200	200	1,43	1,71	2,02	2,38	2,73	3,14	3,61
	MA5_250	250	1,18	1,36	1,62	1,91	2,20	2,58	2,95
	MA5_300	300	1,27	1,51	1,80	2,11	2,38	2,73	3,07
35/50	MA5_X	-	2,03	2,45	2,90	3,41	3,92	4,53	5,21
	MA5_200	200	2,22	2,73	3,31	3,93	4,52	5,21	5,92
	MA5_250	250	1,65	2,01	2,41	2,83	3,22	3,65	4,08
	MA5_300	300	1,62	1,94	2,31	2,69	3,04	3,42	3,80
35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego	MA5_X	-	1,99	2,41	2,85	3,33	3,78	4,31	4,85
	MA5_200	200	1,77	2,10	2,47	2,87	3,27	3,74	4,24
	MA5_250	250	1,03	1,22	1,44	1,69	1,93	2,23	2,54
	MA5_300	300	1,39	1,66	1,95	2,25	2,54	2,87	3,20

* - koniec zakresu pomiarowego penetrometru



Rys. 4-42. Indeks zmiany twardości (penetracja stemplem po 30 minutach badania) asfaltu lanego MA 5 w funkcji temperatury wygrzewania

Wyniki badania penetracji stemplem asfaltu lanego MA 5 przed wygrzewaniem i wygrzewanego w temperaturze, 200, 250 i 300 C przedstawione w tabl. 4-26 i na rys. 4-42 wskazują, że:

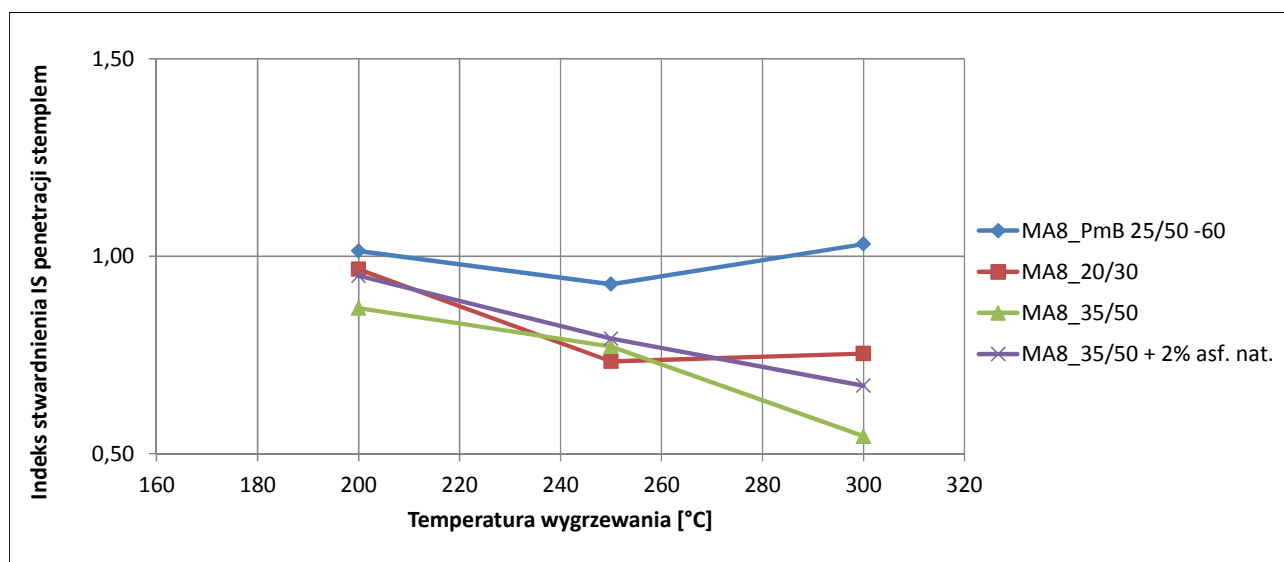
- **asfalt lany MA 5 z polimeroasfaltem PmB 25/55-60** wykazuje w temperaturze 200°C brak wyraźnego wpływu temperatury wygrzewania na zmianę indeksu stwardnienia. W temperaturze 250°C następuje nieznaczny wzrost twardości lepiszcza, prawdopodobnie w wyniku zmiany składu grupowego lepiszcza. Po wygrzewaniu MA 5 w temperaturze 300°C rozpad struktury polimeru powoduje upłynnienie lepiszcza i związany z tym niewielki wzrost indeksu stwardnienia;
- **asfalt lany MA 5 z asfaltem 35/50** wykazuje w temperaturach 250 i 300°C większe utwardzenie, w porównaniu do MA z polimeroasfaltem, co może wskazywać na przejście części żywic w asfalteny.
- **asfalt lany MA 5 z asfaltem 35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego** wykazuje większe utwardzenie w temperaturach badania 200, 250 i 300°C niż asfalt lany MA 8 z asfaltem 35/50 i MA z polimeroasfaltem. Powyżej temperatury 250°C następuje wzrost penetracji, co jest spowodowane upłynniającym działaniem asfaltu naturalnego. Takie zjawisko upłynnienia asfaltu w wysokiej temperaturze nie występuje w przypadku asfaltu lanego z asfaltem 35/50 bez dodatku asfaltu naturalnego.

Na podstawie przedstawionych wyników badań konsystencji określonej metodą penetracji stemplem asfaltów lanych z różnymi lepiszczami, można wnioskować, że w zależności od rodzaju asfaltu obserwuje się mniej lub bardziej intensywną zmianę konsystencji asfaltów lanych MA. Zróznicowanie to jest zależne od rodzaju zastosowanego lepiszcza do MA.

Tablica 4-27. Wyniki badań penetracji stemplem asfaltu lanego MA 8 do izolacji mostowych

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Zagłębienie trzpienia w [mm] odczytane po czasie badania:						
			1 minuta	2 minuta	4 minuta	8 minuta	15 minuta	30 minuta	60 minuta
PmB 25/55-60	MA8_X	-	1,13	1,32	1,53	1,75	1,98	2,26	2,58
	MA8_200	200	1,15	1,33	1,54	1,77	2,00	2,29	2,57
	MA8_250	250	1,15	1,27	1,45	1,65	1,86	2,10	2,36
	MA8_300	300	1,19	1,40	1,63	1,87	2,13	2,33	2,55
20/30	MA8_X	-	1,25	1,51	1,85	2,20	2,57	3,04	3,57
	MA8_200	200	1,18	1,49	1,84	2,19	2,53	2,94	3,39
	MA8_250	250	0,85	1,06	1,34	1,65	1,90	2,23	2,59
	MA8_300	300	0,98	1,23	1,48	1,77	2,01	2,29	2,58
35/50	MA8_X	-	2,04	2,50	3,05	3,63	3,76	5,02	5,83
	MA8_200	200	1,86	2,24	2,73	3,23	3,74	4,36	5,08
	MA8_250	250	1,64	2,05	2,48	2,95	3,38	3,87	4,38
	MA8_300	300	1,37	1,67	1,94	2,22	2,47	2,73	3,00
35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego	MA8_X	-	1,90	2,42	3,03	3,66	4,30	5,03	5,84
	MA8_200	200	1,84	2,32	2,87	3,47	4,06	4,78	5,52
	MA8_250	250	1,85	1,99	2,50	2,98	3,46	3,98	4,49
	MA8_300	300	1,56	1,94	2,27	2,64	2,99	3,38	3,77

* - koniec zakresu pomiarowego penetrometru



Rys. 4-43. Indeks zmiany twardości (penetracja stemplem po 30 minutach badania) asfaltu lanego MA 8 w funkcji temperatury wygrzewania

Wyniki badania penetracji stemplem asfaltu lanego MA 8 przed wygrzewaniem i wygrzewanego w temperaturze, 200, 250 i 300°C z różnymi lepiszczami przedstawiono w tabl. 4-27 i na rys. 4-43 wskazując, że:

- **asfalt lany MA 8 z polimeroasfaltem PmB 25/55-60** wykazuje w temperaturze 200°C, że brak jest wyraźnego wpływu temperatury wygrzewania na zmianę indeksu stwardnienia. W temperaturze 250°C następuje nieznaczny wzrost twardości lepiszcza, prawdopodobnie w wyniku zmiany składu grupowego lepiszcza. Po wygrzewaniu MA 8 w temperaturze 300°C rozpad struktury polimeru powoduje upłynnienie lepiszcza i związany z tym wzrost indeksu stwardnienia;

- **asfalt lany MA 8 z asfaltem 20/30** wykazuje w temperaturze 200°C nieznaczne utwardzenie. MA 8 z twardym asfaltem 20/30 w zakresie temperatur 250 - 300°C charakteryzuje się podobnym indeksem zmiany twardości wynoszącym około 0,75. Wskazuje to, że powyżej temperatury wygrzewania 250°C nie zachodzą w lepiszczu zmiany usztywniające. Porównując wskaźniki usztywnienia MA z polimeroasfaltem i z asfaltem 20/30 można stwierdzić, że temperatura 250°C jest temperaturą graniczną, poniżej której obserwuje się znaczną zmianę konsystencji mieszanki MA z bardzo twardym asfaltem 20/30, większą niż z polimeroasfaltem.

- **asfalt lany MA 8 z asfaltem 35/50** wykazuje we wszystkich badanych temperaturach 200, 250 i 300°C większe utwardzenie, w odniesieniu do polimeroasfaltu i asfaltu 20/30, co może wskazywać na przejście części żywic w asfalteny.

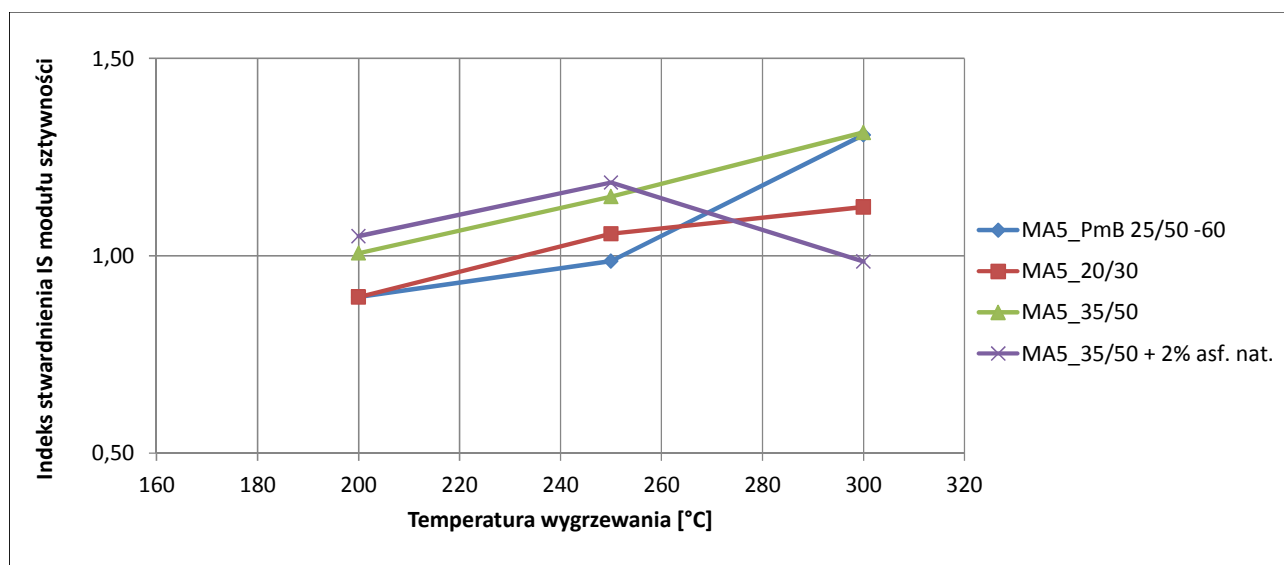
- **asfalt lany MA 8 z asfaltem 35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego** wykazuje niższe utwardzenie w temperaturach badania 200, 250 i 300°C niż asfalt lany MA 8 z asfaltem 35/50, co jest spowodowane upłynniającym działaniem asfaltu naturalnego w wysokich temperaturach technologicznych.

Na podstawie przedstawionych wyników badań konsystencji określonej metodą penetracji stemplem asfaltów lanych z różnymi lepiszczami, można wnioskować, że w zależności od rodzaju asfaltu obserwuje się mniej lub bardziej intensywną zmianę konsystencji asfaltów lanych MA. Zróżnicowanie to jest zależne od rodzaju zastosowanego lepiszcza do MA.

Wyniki badania modułu sztywności (IT-CY) asfaltu lanego przedstawiono w tabl. 4-28 i 4-29 oraz na rys. 4-44 i 4-45.

Tablica 4-28. Wyniki badań modułu sztywności asfaltu lanego MA 5 do izolacji mostowych

Rodzaj lepszczka w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Moduł sztywności w temperaturze 10°C [MPa]
PmB 25/55-60	MA5_X	-	5408
	MA5_200	200	4842
	MA5_250	250	5333
	MA5_300	300	7064
20/30	MA5_X	-	8399
	MA5_200	200	7520
	MA5_250	250	8867
	MA5_300	300	9434
35/50	MA5_X	-	5603
	MA5_200	200	5640
	MA5_250	250	6443
	MA5_300	300	7352
35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego	MA5_X	-	6614
	MA5_200	200	6941
	MA5_250	250	7840
	MA5_300	300	6517

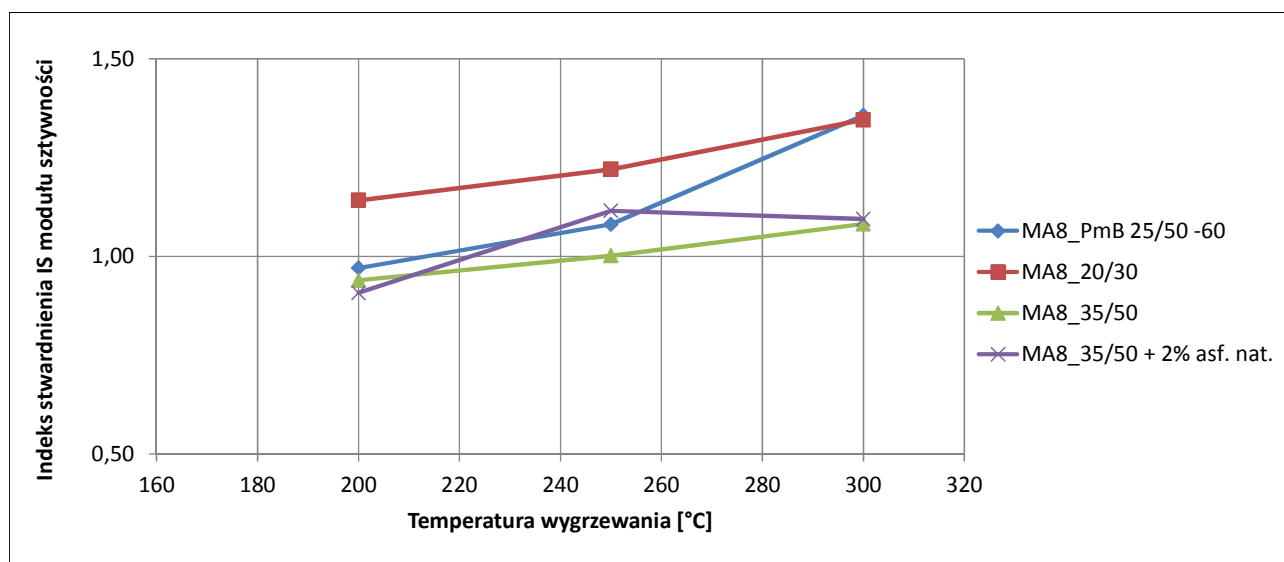


Rys. 4-44. Indeks zmiany modułu sztywności asfaltu lanego MA 5 w funkcji temperatury wygrzewania

Na podstawie analizy wyników badania zmian modułu sztywności IT-CY asfaltu lanego stosowanego do izolacji płyty pomostu obiektu inżynierskiego przedstawionych w tabl. 4-28 oraz na rys. 4-44 można stwierdzić, że moduł sztywności mieszanek asfaltu lanego MA 5 z polimeroasfaltem PmB 25/50-60, po wygrzewaniu w temperaturze 200°C nieznacznie maleje a następnie, wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania wzrasta. Po wygrzewaniu w temperaturze 300°C moduł sztywności mieszanki MA 5 z polimeroasfaltem odpowiada modułowi sztywności mieszanki z asfaltem 35/50. Znacznie większą, stabilnością modułu sztywności w funkcji temperatury wygrzewania, charakteryzuje się asfalt lany MA 5, z asfaltem 35/50 oraz z asfaltem 35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego. Dodatek asfaltu naturalnego korzystnie obniża sztywność mieszanki w zakresie temperatur 250 - 300°C, w wyniku czego mieszanka MA 5 po wygrzewaniu w temperaturze 300°C charakteryzuje się sztywnością odpowiadającą sztywności mieszanki nie poddanej wygrzewaniu (indeks zmiany modułu sztywności IS = 1,0). Wykres indeksu zmiany modułu sztywności mieszanki MA 5 z asfaltem 20/30 charakteryzuje się mniejszym nachyleniem w porównaniu do wykresu MA z polimeroasfaltem PmB 25/50-60, co oznacza, że asfalt lany z asfaltem 20/30 jest bardziej odporny na wysoką temperaturę technologiczną, niż analogiczny asfalt lany z polimeroasfaltem. Zjawisko to można zauważyć szczególnie w zakresie temperatury 250-300°C.

Tablica 4-29. Wyniki badań modułu sztywności asfaltu lanego MA 8 do izolacji mostowych

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Moduł sztywności w temperaturze 10°C [MPa]
PmB 25/55-60	MA8_X	-	5945
	MA8_200	200	5771
	MA8_250	250	6429
	MA8_300	300	8067
20/30	MA8_X	-	8150
	MA8_200	200	9307
	MA8_250	250	9948
	MA8_300	300	10968
35/50	MA8_X	-	6148
	MA8_200	200	5774
	MA8_250	250	6158
	MA8_300	300	6653
35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego	MA8_X	-	6399
	MA8_200	200	5807
	MA8_250	250	7138
	MA8_300	300	7005



Rys. 4-45. Indeks zmiany modułu sztywności asfaltu lanego MA 8 w funkcji temperatury wygrzewania

Mieszanki asfaltu lanego MA 8 (tabl. 4-29 i rys. 4-45) z polimeroasfaltem PmB 25/50-60, asfaltem drogowym 35/50 i asfaltem drogowym 35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego po wygrzaniu w temperaturze 200°C wykazują nieznaczny spadek modułu sztywności w porównaniu do mieszanek MA niewygrzewanych. W odróżnieniu od wymienionych mieszanek asfaltu lanego, MA 8 z asfaltem twardym rodzaju 20/30 ma po wygrzewaniu w temperaturze 200°C wyższy indeks zmiany modułu sztywności w odniesieniu do pozostałych mieszanek MA. Indeks zmiany modułu sztywności MA 8 z asfaltem 20/30 wynosi 1,14.

Analizując układ izoterm modułu sztywności w temperaturze 200 - 250°C, należy stwierdzić, że MA 8 ze wszystkimi lepiszczami wykazują nieznaczne usztywnienie w odniesieniu do wartości usztywnienia w 200°C. Temperaturę 250°C należy uznać za temperaturę graniczną, powyżej której asfalt lany z polimeroasfaltem wykazuje wysoki przyrost modułu sztywności (indeks zmiany modułu sztywności $IS = 1,36$). Asfalty lane z pozostałymi lepiszczami wykazują podobne, nieznaczne wartości usztywnienia (IS około 1,1).

Analizując układ izoterm modułu sztywności w temperaturze wygrzewania 250 - 300°C, należy stwierdzić, że asfalty lane MA 8 z asfaltami drogowymi 20/30 oraz 35/50 charakteryzują się podobnym nachyleniem izoterm indeksów modułu sztywności. Wysoka temperatura, powyżej 250°C niszczy lepkosprężystą strukturę polimeroasfaltu, następuje szybki przyrost indeksu zmiany modułu sztywności i jest on najwyższy dla wszystkich asfaltów lanych poddanych wygrzewaniu.

Asfalt lany MA 8 z lepiszczem modyfikowanym asfaltem naturalnym wykazuje dużą stabilność konsystencji w zakresie temperatur wygrzewania 250 - 300°C. Należy łączyć to ze stabilizującym oddziaływaniem asfaltu naturalnego na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych.

Należy zwrócić uwagę, że wysoka temperatura układania mastyksu lub asfaltu lanego na pomoście betonowym około 230°C może powodować emisję gazów zawartych w porach wierzchniej warstwy betonu. Rozprężanie się gazów powoduje powstawanie pęcherzy w warstwie izolacyjnej i na jej powierzchni [7].

4.3.2 Izolacja z mastyksu (tradycyjnego)

W celu określenia oddziaływania wysokiej temperatury na właściwości użytkowe (funkcjonalne) izolacji mostowej wykonanej z mieszanki mineralno-asfaltowej, przeprowadzono badania mastyksu tradycyjnego o uziarnieniu do 2 mm.

Wymagania odnośnie mastyksu

Zaprojektowano mieszankę mineralno-asfaltową (mastyks) kategorii ruchu KR3-KR6 zgodnie z Katalogiem Zabezpieczeń Powierzchniowych Drogowych Obiektów Inżynierskich, opracowanym przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów [8]. Warstwa izolacji z mieszanki mineralno-asfaltowej typu mastyksowego powinna mieć grubość 10-12 mm.

Materiały

Do mieszanki mineralno-asfaltowej typu mastyks izolacyjny zastosowano następujące materiały:

- wypełniacz dodany - mączka wapienna Wolica,
- piasek łamany frakcji 0/0,063 mm, z otoczków Paczków,
- lepiszcza:
 - PmB 45/80-55,
 - 35/50,
 - 35/50 + 2,0% (m/m) asfaltu naturalnego.

Badania materiałów kamiennych – uziarnienie

W celu ustalenia optymalnego składu mieszanki mineralnej do mastyksu wykonano oznaczenie składu ziarnowego materiałów kamiennych. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego wypełniacza i piasku przedstawiono w tabl. 4-30.

Tablica 4-30. Uziarnienie materiałów kamiennych

Wymiar boku kwadratowego oczka sita [mm]	Zawartość ziaren pozostających na sicie [%]	
	Mączka wapienna Wolica	Piasek łamany z otoczków Paczków 0,063/2
5,6	0,0	0,0
4,0	0,0	0,0
2,0	0,0	5,9
1,0	0,0	26,9
0,5	0,0	32,7
0,25	0,0	21,0
0,125	4,9	8,6
0,063	19,7	2,9
< 0,063	75,4	2,0
Σ	100,0	100,0

Uziarnienie wypełniacza mieści się w granicach wymagań od 70 – 100% ziaren przechodzących przez sito 0,063 mm. Piaski charakteryzują się uziarnieniem w granicach nie przekraczających wymagań wg WT-1: 2010 dotyczących asfaltów lanych (brak wymagań w WT-2 odnośnie mastyksu izolacyjnego).

Badania materiałów kamiennych – gęstość

Oznaczenie gęstości materiałów kamiennych wykonano zgodnie z normą PN-EN 1097-6 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości ziaren i nasiąkliwości.” [N12] i PN-EN 1097-7 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna” [N13].

Wyniki oznaczenia przedstawiono w tabl. 4-31.

Tablica 4-31. Gęstości piasku i wypełniacza

Rodzaj kruszywa	Gęstość, [g/cm ³]
Piasek łamany z otoczków Paczków	2,703
Mączka wapienna Wolica	2,710

Ustalenie składu mieszanki mineralno-asfaltowej typu mastyks izolacyjny (tradycyjny)

Mieszanke mineralno-asfaltową typu mastyksowego (mastyks izolacyjny) zaprojektowano zgodnie z wymaganiami Katalogu Zabezpieczeń Powierzchniowych Drogowych Obiektów Inżynierskich IBDiM [8]. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej przedstawiono w tabl. 4-32.

Tablica 4-32. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej typu mastyks izolacyjny (tradycyjny)

Materiały	Skład mieszanki mineralnej [%]	Skład mma typu mastyks izolacyjny [%]
Asfalt drogowy: 35/50	0,0	13,0
Mączka wapienna Wolica	40,2	35,0
Piasek łamany z otoczków Paczków	59,8	52,0
Σ	100,0	100,0

Ze względu na poprawę odporności na deformacje trwałe mastyksu, zastosowano wyłącznie piasek łamany.

Program badań mastyksu izolacyjnego

Mieszanki mineralno-asfaltowe stosowane do wykonywania izolacji mostowych, podczas produkcji, transportu i układania mogą być narażone na oddziaływanie wysokich temperatur, przewyższających temperatury wymagane procesami technologicznymi. Dodatkowo, izolacja z MMA (np. mastyks, asfalt lany) jest ponownie rozgrzewana po ułożeniu na jej powierzchni gorącej warstwy ochronnej o temperaturze 160-230°C. Oddziaływanie wysokiej temperatury powyżej 200°C może powodować zmianę właściwości lepizczy a tym samym zmianę właściwości lepkosprężystych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Podobnie jak w przypadku asfaltów lanych należy zwrócić uwagę, że wysoka temperatura układania mastyksu lub asfaltu lanego na pomoście betonowym około 230°C może powodować emisję gazów zawartych w porach wierzchniej warstwy betonu. Rozprężanie się gazów powoduje powstawanie pęcherzy w warstwie izolacyjnej i na jej powierzchni [7].

W celu określenia odporności na wysokie temperatury przy wytwarzaniu, transporcie i układaniu mieszanek mineralno-asfaltowych do izolacji mostowych, mastyks izolacyjny poddano wygrzewaniu w temperaturze: 200, 250 i 300°C. Czas wygrzewania wynosił 1 godzinę. Po procesie wygrzewania mastyks schłodzono a następnie wycięto, za pomocą koronki wiertniczej o średnicy 100 mm, próbki analityczne do badań (rys. 4-46).



Rys. 4-46. Próbkki analityczne mastyksu izolacyjnego po wygrzewaniu w temperaturze 200°C przygotowane do badań (widoczna dolna powierzchnia próbek)

Badane mastyksy, w celach porównawczych, wykonane zostały z polimeroasfaltem PmB 45/80-55, z asfaltem drogowym 35/50 oraz z asfaltem 35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego Trinidad.

Do oceny zmian właściwości mastyksu tradycyjnego pod wpływem wysokiej temperatury 200, 250 i 300 °C wykonano badania penetracji stemplem (twardości) oraz badania modułu sztywności próbek MMA nie wygrzewanych oraz poddanych wygrzewaniu.

Szczegółowy program badań mastyksu do izolacji mostowych przedstawiono poniżej:

- pomiar penetracji stemplem w temperaturze 40°C wg PN-EN 12697-20 [N14],
- pomiar modułu sztywności w rozciąganiu pośrednim, metoda IT-CY wg PN-EN 12697-26 [N15].

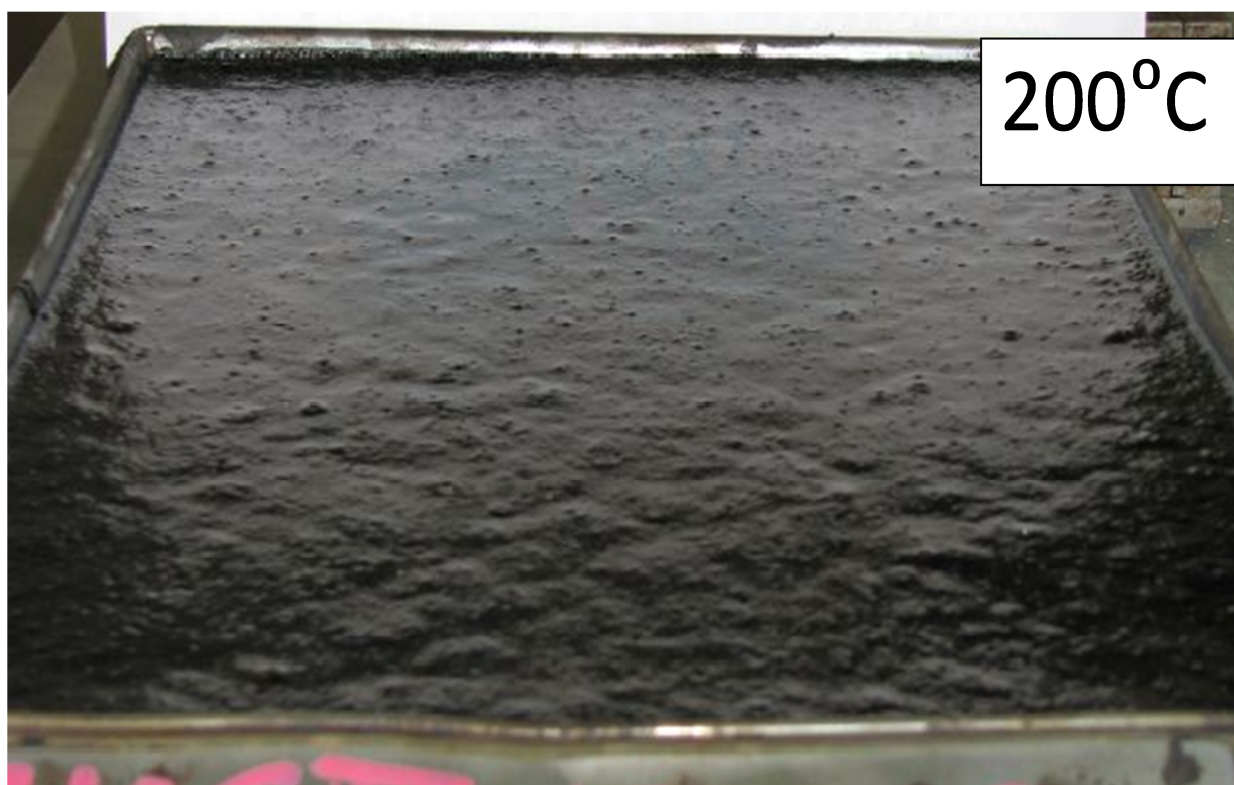
Badanie penetracji stemplem oraz badanie modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej opisano szczegółowo w punkcie 4.3.1.

Wyniki badań mastyksu izolacyjnego

Zmiany wyglądu powierzchni próbek mastyksu niewygrzewanego oraz próbek mastyksu po procesie wygrzewania pokazano na rys. 4-47 do 4-50.



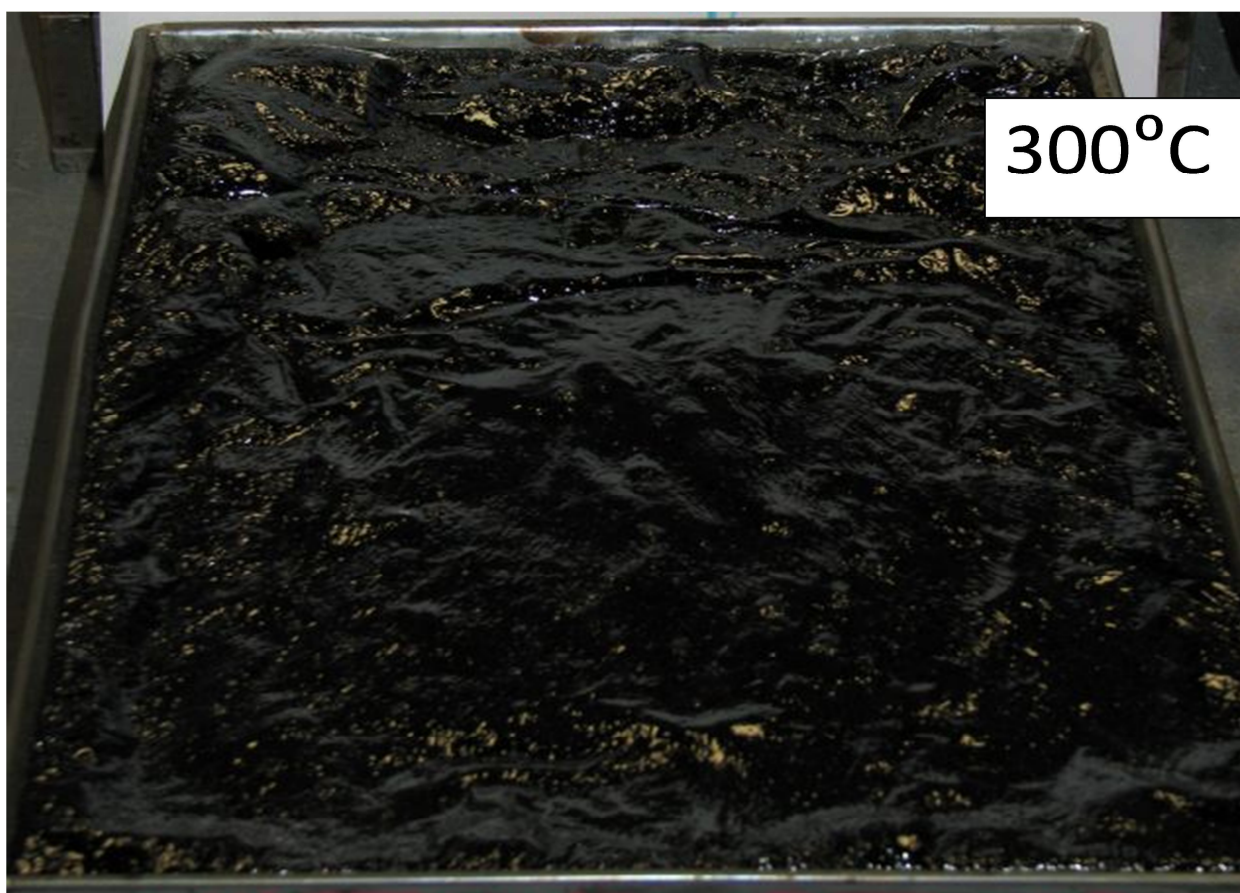
Rys. 4-47. Mastyks izolacyjny nie poddany wygrzewaniu



Rys. 4-48. Mastyks izolacyjny wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 200°C



Rys. 4-49. Mastyks izolacyjny wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 250°C



Rys. 4-50. Mastyks izolacyjny wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 300°C

Na podstawie oceny wizualnej zmiany powierzchni próbek mastyksu poddanych wygrzewaniu przez 1 godzinę, w temperaturze 200°C, stwierdzono nieznaczne zmiany na powierzchni próbek w postaci nierówności w porównaniu do wyglądu powierzchni mastyksu nie wygrzewanego. W wyniku oddziaływania wysokiej temperatury (250°C i 300°C) powierzchnia mastyksu uległa znacznemu zniekształceniu, wystąpiły liczne nierówności w postaci sfalowań i pęcherzy.

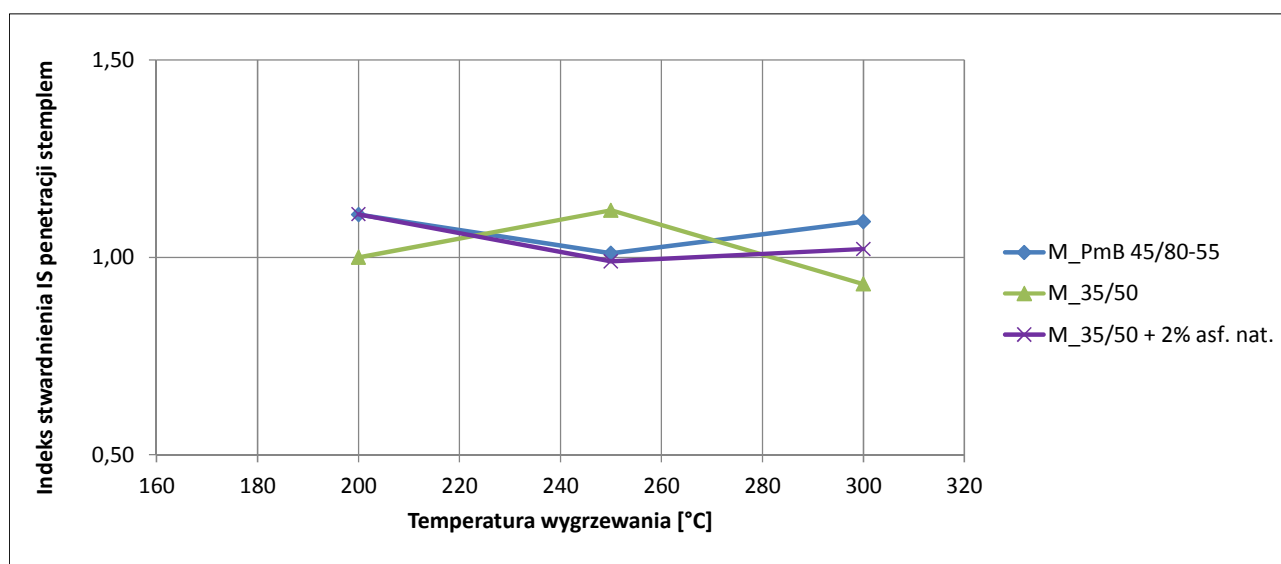
Wyniki badania zmiany penetracji stemplem oraz zmiany modułu sztywności IT-CY mastyksu stosowanego do wykonywania izolacji pomostów obiektów inżynierskich niewygrzewanego (oryginalnego) oraz wygrzewanego w temperaturze 200, 250 i 300°C przedstawiono w tabl. 4-33 i 4-34.

Na rys. 4-51 przedstawiono w formie graficznej indeksy zmiany twardości mastyksu (IS) określone na podstawie pomiarów penetracji stemplem a na rys. 4-52 indeksy zmiany modułu sztywności w funkcji temperatury wygrzewania 200, 250 i 300°C.

Indeks zmiany twardości (IS pen. stemplem) obliczono na podstawie wzoru (9) a indeks zmiany modułu sztywności (IS modułu szt.) obliczono na podstawie wzoru (10). Wzory przedstawiono w punkcie 4.3.1.

Tablica 4-33. Wyniki badań penetracji stemplem mastyksu do izolacji mostowych

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Zagłębienie trzpienia w [mm] odczytane po czasie badania:						
			1 minuta	2 minuta	4 minuta	8 minuta	15 minuta	30 minuta	60 minuta
PmB 45/80-55	M_X	-	5,00	6,16	7,59	9,06	11,85	11,95	11,95
	M_200	200	6,88	9,41	12,91	13,24	13,24	13,24	13,24
	M_250	250	7,57	10,18	12,04	12,05	12,06	12,07	12,07
	M_300	300	7,99	10,86	13,00	13,02	13,03	13,03	13,03
35/50	M_X	-	8,76	11,60	11,66	11,68	11,68	11,68	11,69
	M_200	200	8,01	10,92	11,65	11,67	11,67	11,68	11,68
	M_250	250	4,91	6,73	9,18	12,06	13,05	13,07	13,07
	M_300	300	9,59	10,85	10,86	10,87	10,87	10,89	10,98
35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego	M_X	-	6,63	9,64	11,90	11,93	11,93	11,93	11,94
	M_200	200	6,08	10,14	13,71	13,72	13,73	13,23	13,24
	M_250	250	6,95	8,93	11,73	11,80	11,81	11,81	11,81
	M_300	300	6,53	8,99	12,12	12,18	12,18	12,18	12,18



Rys. 4-51. Indeks zmiany twardości (penetracja stemplem po 30 minutach badania) mastyksu izolacyjnego w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

Wyniki badania penetracji stemplem mastyksu tradycyjnego w funkcji temperatury wygrzewania zestawione w tabl. 4-33 oraz graficznie na rys. 4-51 wskazują, że mastyks z asfaltem drogowym 35/50 charakteryzuje się brakiem zmian konsystencji w temperaturze wygrzewania 200°C, nieznacznym uplastycznieniem w temperaturze wygrzewania 250°C i utwardzeniem w temperaturze 300°C (indeks stwardnienia IS = 0,93). Utwardzenie jest spowodowane ewentualnym przejściem części żywic w asfalteny. Wg literatury zjawisko uplastycznienia asfaltu w wysokich temperaturach wygrzewania, może

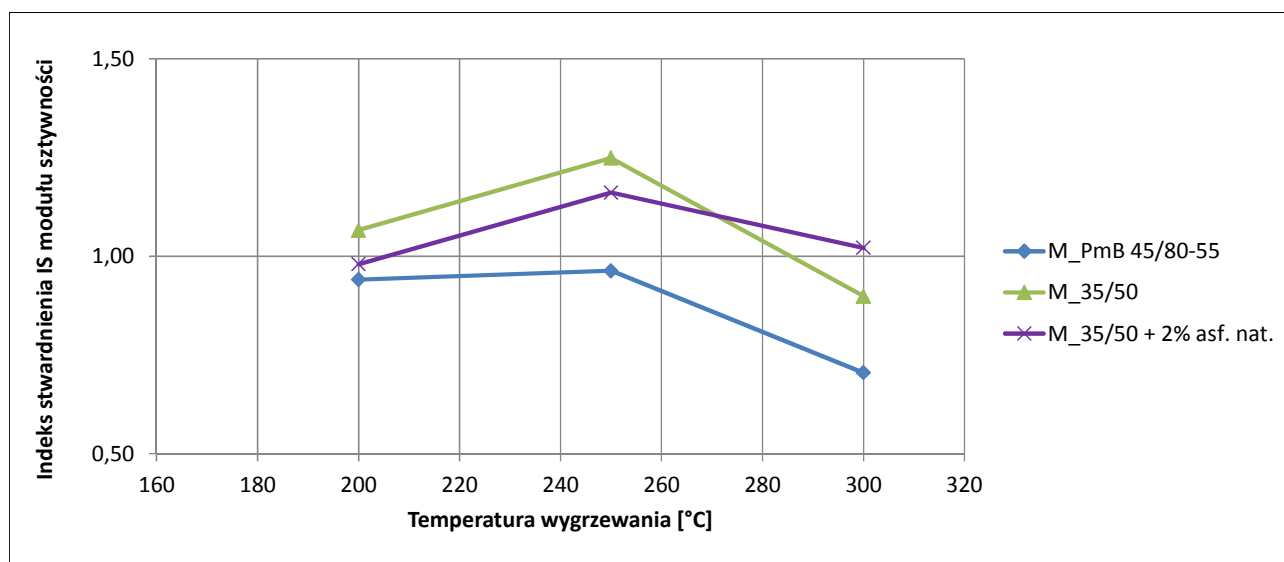
być, w niektórych przypadkach, spowodowane konwersją składników grupowych asfaltu (żywice → oleje).

Mastyks z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 wykazuje w temperaturze 200°C nieznaczny wzrost indeksu stwardnienia powyżej 1,0 (IS = 1,09). W zakresie temperatur wygrzewania 200 - 250°C następuje nieznaczne utwardzenie mastyksu z polimeroasfaltem (około 1,0). Wyższa temperatura wygrzewania, powyżej 250°C powoduje nieznaczne upłynnienie asfaltu, prawdopodobnie w wyniku zniszczenia struktury polimeroasfaltu.

Mastyks z asfaltem 35/50 i 2,0% dodatkiem asfaltu naturalnego Trinidad wygrzewany w temperaturze 200°C charakteryzuje się niewielkim wzrostem penetracji w stosunku do mieszanki nie poddanej procesowi wygrzewania. W zakresie temperatury wygrzewania 250 - 300°C dodatek asfaltu naturalnego stabilizuje konsystencję mastyksu na poziomie konsystencji mastyksu nie wygrzewanego (IS = 1,0). Można stwierdzić, że dodatek asfaltu naturalnego wpływa korzystnie na zmianę konsystencji mastyksu izolacyjnego, poddanego oddziaływaniu wysokiej temperatury technologicznej.

Tablica 4-34. Wyniki badań modułu sztywności mastyksu tradycyjnego do izolacji mostowych

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Moduł sztywności w temperaturze 10°C [MPa]
PmB 45/80-55	M_X	-	2010
	M_200	200	1891
	M_250	250	1936
	M_300	300	1417
35/50	M_X	-	2504
	M_200	200	2669
	M_250	250	3126
	M_300	300	2250
35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego	M_X	-	2631
	M_200	200	2578
	M_250	250	3055
	M_300	300	2687



Rys. 4-52. Indeks zmiany modułu sztywności mastyksu izolacyjnego w funkcji temperatury wygrzewania lepizsca

Na podstawie analizy wyników badań zmian wartości modułu sztywności mastyksu, zestawionych w tabl. 4-34 i na rys. 4-52, można stwierdzić, że mastyks izolacyjny z asfaltem 35/50 w miarę wzrostu temperatury wygrzewania od 200 do 250°C wykazuje znaczny wzrost indeksu zmiany modułu sztywności IS. W tym samym zakresie temperatur wygrzewania, mastyks z polimeroasfaltem wykazuje tylko nieznaczne zmiany indeksu zmiany modułu sztywności IS. Temperatura wygrzewania 250°C jest dla mastyksów z asfaltem 35/50 i polimeroasfaltem temperaturą krytyczną, powyżej której następuje znaczny spadek modułu sztywności. Moduł sztywności w temperaturze wygrzewania 300°C mastyksu z asfaltem 35/50 jest nieznacznie niższy od modułu sztywności asfaltu wyjściowego, co może być spowodowane utratą lepkościowych właściwości mastyksu. Indeks zmiany modułu sztywności mastyksu z polimeroasfaltem w temperaturze wygrzewania w zakresie 250 - 300°C wykazuje znaczny spadek ($IS = 0,7$). Tak znaczne uplastycznienie mastyksu jest wynikiem degradacji struktury sieci polimerowej, wskutek oddziaływania temperatury powyżej 250°C. Mastyks izolacyjny z asfaltem 35/50 i dodatkiem 2% asfaltu naturalnego charakteryzuje się łagodniejszym przebiegiem wykresu indeksu zmiany modułu sztywności niż mastyks tylko z asfaltem 35/50. Dodatek asfaltu naturalnego zwiększa odporność mastyksu na oddziaływanie wysokiej temperatury. Po wygrzewaniu mastyksu z dodatkiem asfaltu naturalnego w temperaturze 300°C, indeks zmiany modułu sztywności odpowiada indeksowi mastyksu nie wygrzewanego ($IS = 1,0$).

4.3.3 Izolacja z mastyksu o zwiększonej zawartości frakcji grysowej (SMA/MA)

Mastyks wysokogrysowy (SMA/MA) jest nowym rodzajem mieszanki mineralno-asfaltowej w technologii „na gorąco” przeznaczony przede wszystkim do izolacji pomostów obiektów inżynierskich ale również może być stosowany do warstw ochronnych izolacji. Tego rodzaju mieszanki zostały już zaproponowane w [37] jako warstwy izolacyjne w przykładowych niemieckich rozwiązaniach systemów nawierzchniowych na obiektach mostowych. Idea mastyksu wysokogrysowego polega na połączeniu korzystnych cech mastyksu tradycyjnego, tj. szczelności, elastyczności, z korzystnymi cechami mieszanek typu SMA, z których najważniejszą jest odporność na deformacje trwałe. Mieszanki tego typu charakteryzują się nieciągłą krzywą uziarnienia oraz minimalną zawartością wolnych przestrzeni w zagęszczonej warstwie (0,3 do 0,8%).

Wymagania odnośnie mastyksu wysokogrysowego SMA/MA

Zaprojektowano mieszankę mineralno-asfaltową typu mastyks wysokogrysowy (SMA/MA) o uziarnieniu 8 mm (SMA/MA 8) kategorii ruchu KR3-KR6 wykorzystując wymagania odnośnie uziarnienia dla mieszanki SMA, zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1]. Wymagane uziarnienie mieszanek typu SMA przedstawiono w punkcie 4.4.2.

Projektując mieszankę mineralną typu SMA/MA z wykorzystaniem krzywych uziarnienia standardowych mieszanek typu SMA, kierowano się zasadą znacznego zwiększenia zawartości drobnych frakcji (piaskowej i wypełniaczowej) przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej zawartości frakcji grysowej powyżej 70%. Ponadto, w celu zapewnienia maksymalnej szczelności zagęszczonej mieszanki SMA/MA, zaprojektowano podwyższoną zawartość lepiszcza asfaltowego do 9%. Tak duża zawartość lepiszcza oraz znacznie zwiększona zawartość wypełniacza mineralnego, powodują konieczność zastosowania stabilizatora mastyksu.

Materiały

Do mieszanek mineralno-asfaltowych typu mastyks wysokogrysowy zastosowano następujące materiały:

- wypełniacz dodany - mączka wapienna Wolica,
- piasek łamany frakcji 0/0,063 mm, z otoczków Paczków,
- grys frakcji 2/5 mm, gabro Słupiec,
- grys frakcji 5/8 mm, gabro Słupiec,
- grys frakcji 8/11 mm, gabro Słupiec,
- stabilizator mastyksu – włókno celulozowe,
- lepiszcza:
 - PmB 45/80-55,
 - lepiszcze gumowo-asfaltowe o zawartości rozdrobnionej gumy min. 15% (m/m), o uziarnieniu do 1,0 mm i penetracji około 50-70 [$\cdot$ 0,1 mm].

Badania materiałów kamiennych – uziarnienie

W celu ustalenia optymalnego składu mieszanki mineralnej wykonano oznaczenie składu ziarnowego materiałów kamiennych zgodnie z normą PN-EN 933-1 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania.” Poszczególne kruszywa przesiewano przez normowy zestaw sit (zestaw podstawowy +1), metodą „na sucho”. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego poszczególnych kruszyw przedstawiono w tabl. 4-35.

Tablica 4-35. Skład ziarnowy materiałów kamiennych do mastyksu wysokogrysowego SMA/MA

Wymiar boku kwadratowego oczka sita [mm]	Zawartość ziaren pozostających na sicie [%]			
	Mączka wapienna Wolica	Piasek łamany z otoczków Paczków 0,063/2	Grys gablo Słupiec 2/5	Grys gablo Słupiec 5/8
45,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,2	0,0	0,0	0,0	0,0
8,0	0,0	0,0	0,0	8,0
5,6	0,0	0,0	1,1	60,7
4,0	0,0	0,2	30,9	25,2
2,0	0,0	12,9	58,6	4,3
1,0	0,0	34,6	6,2	1,0
0,5	0,0	27,7	1,1	0,2
0,25	0,2	15,8	0,4	0,2
0,125	1,0	6,2	0,3	0,2
0,063	16,1	1,6	0,3	0,1
< 0,063	82,9	1,0	1,2	0,3
Σ	100,0	100,0	100,0	100,0

Uziarnienie wypełniacza mieści się w granicach wymagań od 70 – 100% ziaren przechodzących przez sito 0,063 mm. Piaski oraz grys mają uziarnienia w granicach nie przekraczających wymagań wg WT-1:2010 [N11] dotyczących mieszanek SMA.

Badania materiałów kamiennych – gęstość

Oznaczenie gęstości materiałów kamiennych zostało wykonane metodą piknometryczną wg PN-EN 1097-6 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości” [N10] i PN-EN 1097-7 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna” [N12]. Metoda polega na obliczeniu ilorazu masy ziaren i ich objętości, określonej za pomocą piknometru. Wyniki oznaczenia przedstawia tabl. 4-36.

Tablica 4-36. Gęstości kruszyw i wypełniacza

Rodzaj kruszywa	Gęstość, [g/cm ³]
Grys gąbro Słupiec 5/8	2,975
Grys gąbro Słupiec 2/5	2,962
Piasek łamany z otoczków Paczków	2,651
Mączka wapienna Wolica	2,700

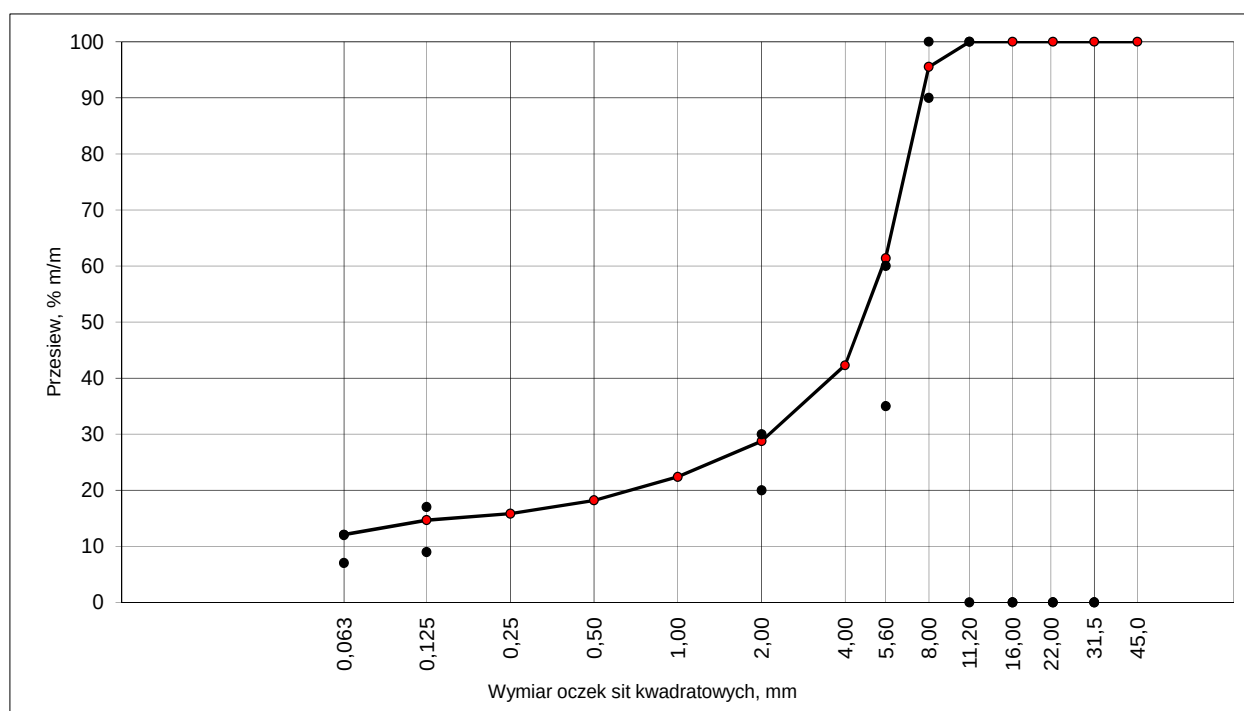
Gęstość kruszyw wykorzystano do ustalania współczynnika korygującego zawartość lepiszcza wg WT-2: 2010 [N1].

Ustalenie składu mieszanki mineralno-asfaltowej typu SMA/MA

Projekt mieszanki mineralnej

Mieszanke mineralno-asfaltową typu mastyks wysokogrysowy zaprojektowano wykorzystując wymagania odnośnie uziarnienia dla mieszanki SMA, zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N11]. Zaprojektowano 2 rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych typu SMA/MA 8, dla kategorii ruchu KR3 do KR6, zróżnicowanych pod względem rodzaju lepiszcza.

Krzywe uziarnienia zaprojektowanej mieszanki mineralnej do mastyksu wysokogrysowego SMA/MA 8 przedstawiono na rys. 4-53.



Rys. 4-53. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej do asfaltu lanego SMA/MA 8

Ustalenie zawartości stabilizatora mastyksu – badanie spływności

W celu obliczenia optymalnej ilości stabilizatora mastyksu przeprowadzono badanie spływności mastyksu metodą Schellenberga (tabl. 4-37), zgodnie z PN-EN 12697-18 [N15].

Tablica 4-37. Spływność mastyksu mieszanki SMA/MA 8

Zawartość stabilizatora, [%]	Spływność, [%]
0,3	0,25
0,4	0,21
0,5	0,13

Przyjmuje się, że optymalna zawartość stabilizatora mastyksu w mieszance mineralno-asfaltowej pozwala na uzyskanie spływności metodą Schellenberga nie większą niż 0,30% (0,28 – 0,30%) w stosunku do masy mieszanki mineralno-asfaltowej. Na podstawie otrzymanych wyników badań spływności mastyksu stwierdzono, że wystarczająca zawartość stabilizatora celulozowego, wynosi 0,3%. Oznacza to, że zaprojektowana mieszanka typu mastyks wysokogrysowy nie wymaga zwiększonej ilości stabilizatora w porównaniu do mieszanki typu SMA. Spływność mastyksu należy jednak każdorazowo sprawdzać.

Ustalenie zawartości wolnej przestrzeni w mieszankach typu SMA/MA

Podstawową cechą mastyksu wysokogrysowego jest szczelna struktura mieszanki mineralno-asfaltowej, o średniej zawartości wolnych przestrzeni w zagęszczonej próbce na poziomie około 0,5% (od 0,3 do 0,8% m/m). W celu zaprojektowania optymalnego składu SMA/MA, przeprowadzono badania gęstości mieszanki mineralno-asfaltowej SMA/MA wg PN-EN 12697-5 [N16] i gęstości objętościowej mieszanki SMA/MA wg PN-EN 12697-6 [N17]. Na podstawie uzyskanych wyników badań obliczono zawartość wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach zgodnie z PN-EN 12697-8 [N18]. Wyniki badań gęstości i gęstości objętościowej mieszanki mineralno-asfaltowej oraz obliczone zawartości wolnej przestrzeni SMA/MA 8 przedstawiono w tabl. 4-38.

Tablica 4-38. Gęstości oraz zawartość wolnych przestrzeni mieszanki SMA/MA 8

Mieszanka mineralno-asfaltowa	Gęstość objętościowa MMA	Gęstość MMA	Zawartość wolnej przestrzeni w próbkach MMA
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]
SMA/MA 8_nr1	2466	2486	0,8
SMA/MA 8_nr 2	2466	2480	0,6
Średnia:			0,7

Na podstawie uzyskanych wyników badań zawartości wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach SMA/MA stwierdzono, że zaprojektowany skład mieszanki mineralnej oraz przyjęta zawartość lepiszcza pozwalają na uzyskanie optymalnej zawartości wolnej przestrzeni, na poziomie około 0,7% (m/m).

Ostateczny skład mieszanki mineralno-asfaltowej

Ostateczny skład mieszanki mineralno-asfaltowej typu SMA/MA 8 przedstawiono w tabl. 4-39.

Tablica 4-39. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej (mma) typu SMA/MA 8

Składniki	Skład SMA/MA 8 [%]
Lepiszczce	9,0
Mączka wapienna Wolica	12,7
Piasek łamany z otoczków Paczków	12,7
Grys gablo Słupiec 2/5	14,6
Grys gablo Słupiec 5/8	51,0
	100,0

Idea projektowania izolacji z mastyksu wysokogrysowego polega na założeniu, że szkielet grysowy klinujących się ziaren, zapewni odporność na deformacje trwałe warstw SMA/MA o grubości do 2,5 cm (wyjątkowo do 4 cm), nawet przy dużej zawartości lepiszcza. Ze względu na konieczność uzyskania niskiej zawartości wolnej przestrzeni w mastyksie wysokogrysowym, na poziomie około 0,5% (m/m), przyjęto zawartość lepiszcza 9,0% (m/m).

Program badań mastyksu wysokogrysowego

W celu określenia odporności na wysokie temperatury przy wytwarzaniu, transporcie i układaniu mieszanek mineralno-asfaltowych, luźną mieszankę mastyksu wysokogrysowego (SMA/MA) poddano wygrzewaniu w temperaturze: 200, 250 i 300°C w warstwie około 50 mm. Czas wygrzewania wynosił 1 godzinę. Po procesie wygrzewania zaformowano próbki cylindryczne Marshalla z wykorzystaniem prasy żyratorowej (rys. 4-54).

Próbki mastyksu wysokogrysowego zostały wykonane z polimeroasfaltem PmB 45/80-55, oraz z lepiszczem gumowo-asfaltowym o zawartości rozdrobnionej gumy min. 15% (m/m), o uziarnieniu do 1,0 mm i penetracji około 50-70 [$\cdot$ 0,1 mm].



Rys. 4-54. Próbki mastyksu wysokogrysowego SMA/MA 8 z lepiszczem gumowo-asfaltowym przed wygrzewaniem (z lewej strony) oraz po wygrzewaniu w temperaturze 300°C przygotowane do badań

W celu oceny zmian właściwości mastyksu wysokogrynowego pod wpływem wysokiej temperatury 200, 250 i 300 °C wykonano badania penetracji stemplem (twardości) oraz badania modułu sztywności próbek SMA/MA nie wygrzewanych oraz poddanych wygrzewaniu.

Szczegółowy program badań asfaltu lanego do izolacji mostowych przedstawiono poniżej:

- pomiar penetracji stemplem w temperaturze 40°C wg PN-EN 12697-20 [N14],
- pomiar modułu sztywności w rozciąganiu pośrednim w temperaturze 10°C, metoda IT-CY wg PN-EN 12697-26 [N15],
- pomiar odporności na działanie wody i mrozu w temperaturze 25°C (wskaźnik ITSr) wg PN-EN 12697-12 [N25] i PN-EN 12697-23 [N26] – metodyka opisana w punkcie 4.4.2.

Badanie penetracji stemplem oraz badanie modułu sztywności IT-CY mieszanki mineralno-asfaltowej opisano szczegółowo w punkcie 4.3.1.

Wyniki badań mastyksu wysokogrysowego SMA/MA

Zmiany wyglądu powierzchni próbek mastyksu wysokogrysowego SMA/MA po procesie wygrzewania pokazano na rys. 4-55 do 4-57.



Rys. 4-55. Mastyks wysokogrysowy SMA/MA 8 z polimeroasfaltem wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 200°C



Rys. 4-56. Mastyks wysokogrysowy SMA/MA 8 z polimeroasfaltem wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 250°C



Rys. 4-57. Mastyks wysokogrysowy SMA/MA 8 z polimeroasfalem wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 300°C

Na podstawie oceny wizualnej zmiany wyglądu luźnej mieszanki mastyksu wysokogrysowego z polimeroasfalem PmB 45/80-55, poddanej wygrzewaniu przez 1 godzinę, w temperaturze 200 i 250°C, nie stwierdzono wyraźnych zmian w wyglądzie mieszanki mineralno-asfaltowej. Mieszanka mastyksu wysokogrysowego SMA/MA 8 poddana oddziaływaniu temperatury 300°C uległa segregacji. Polimeroasfalt częściowo spłynął z mieszanki mineralnej, odsłaniając pojedyncze ziarna frakcji grysowej.

Przed zaformowaniem próbek do badań, wygrzewana mieszanka została ujednoliconą.

Mastyks wysokogrysowy SMA/MA przewożony jest w kotłach wyposażonych w mieszadła. Proces ciągłego mieszania skutecznie eliminuje zjawisko segregacji mieszanki w wysokiej temperaturze.

Penetracja stemplem oraz moduł sztywności mieszanki SMA/MA w funkcji temperatury wygrzewania

Wyniki badań właściwości mastyksu wysokogrysego do izolacji mostowych niewygrzewanego (oryginalnego) oraz wygrzewanego w temperaturze 200, 250 i 300°C przedstawiono w tabl. 4-40 oraz 4-41.

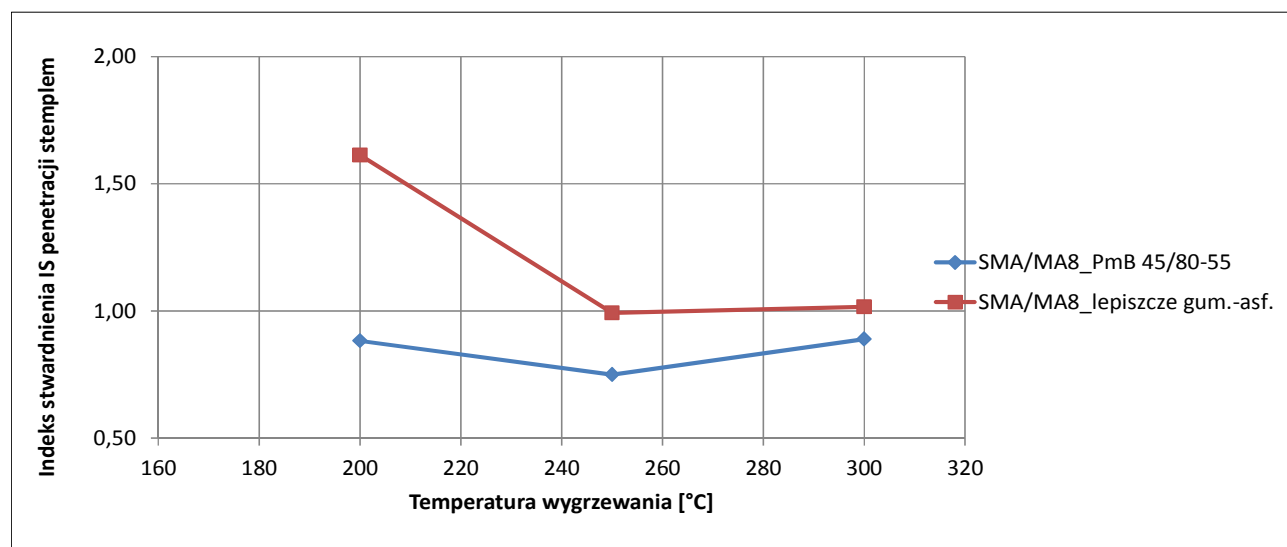
Na rys. 4-58 przedstawiono w formie graficznej indeksy zmiany twardości mastyksu (IS) określone na podstawie pomiarów penetracji stemplem a na rys. 4-59 indeksy zmiany modułu sztywności w funkcji temperatury wygrzewania 200, 250 i 300°C.

Indeks zmiany twardości (IS pen. stemplem) obliczono na podstawie wzoru (9) a indeks zmiany modułu sztywności (IS modułu szt.) obliczono na podstawie wzoru (10). Wzory przedstawiono w punkcie 4.3.1.

Tablica 4-40. Wyniki badań penetracji stemplem asfaltu lanego SMA/MA 8 do izolacji mostowych

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Zagłębienie trzpienia w [mm] odczytane po czasie badania:						
			1 minuta	2 minuta	4 minuta	8 minuta	15 minuta	30 minuta	60 minuta
PmB 45/80-55	SMA/MA8_X	-	1,01	1,10	1,17	1,23	1,29	1,36	1,42
	SMA/MA8_200	200	0,84	0,93	1,01	1,07	1,14	1,20	1,25
	SMA/MA8_250	250	0,66	0,79	0,83	0,90	0,96	1,02	1,08
	SMA/MA8_300	300	0,74	0,91	1,01	1,09	1,15	1,21	1,28
Lepiszcz gumowo-asfaltowe	SMA/MA8_X	-	0,87	0,95	1,04	1,05	1,08	1,24	1,30
	SMA/MA8_200	200	1,11	1,28	1,45	1,63	1,80	2,00	2,16
	SMA/MA8_250	250	0,81	0,91	1,00	1,08	1,16	1,23	1,31
	SMA/MA8_300	300	0,78	0,87	0,96	1,07	1,16	1,26	1,37

* - koniec zakresu pomiarowego penetrometru



Rys. 4-58. Indeks zmiany twardości (penetracja stemplem po 30 minutach badania) asfaltu lanego SMA/MA 8 w funkcji temperatury wygrzewania

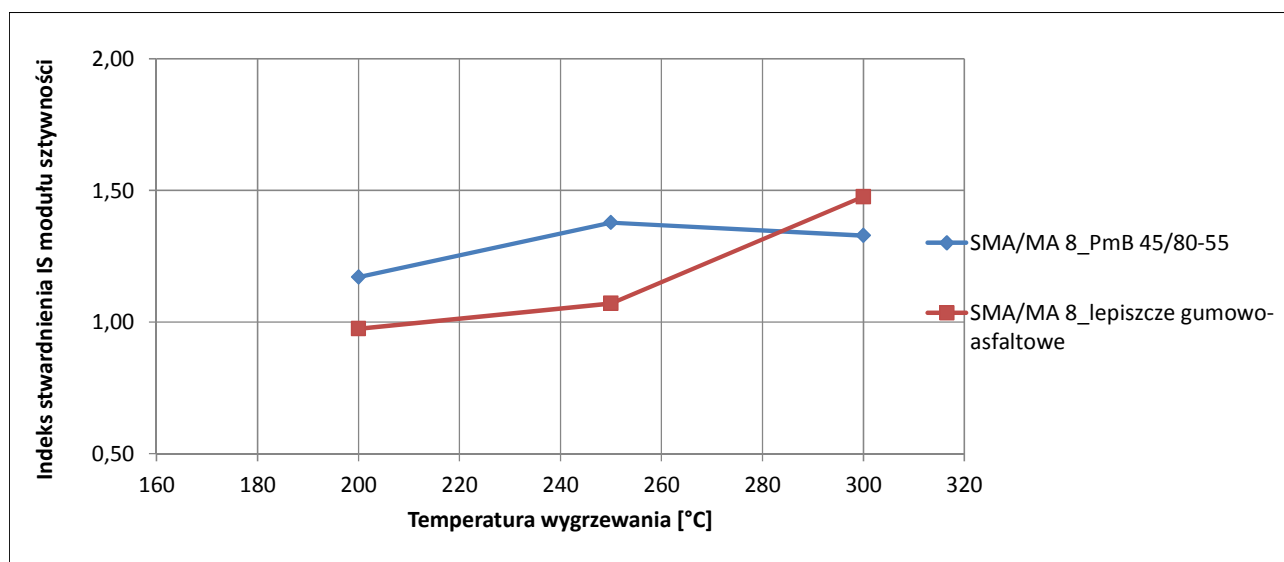
Na podstawie wyników badania penetracji stemplem mieszanki mineralno-asfaltowej typu mastyks wysokogrysowy SMA/MA 8 z polimeroasfaltem, przeznaczonego na warstwę izolacji pomostu obiektu inżynierskiego, przedstawionych w tabl. 4-40 i na rys. 4-58 stwierdzono, że temperatura wygrzewania 200°C powoduje obniżenie indeksu zmiany twardości z wartości referencyjnej równej 1,0 do wartości 0,88. W zakresie temperatur 200 - 250°C następuje dalsze obniżenie wartości IS do 0,75. Można sądzić, że w zakresie tych temperatur SMA/MA z polimeroasfaltem wykazuje właściwości lepkosprężyste. Dalsze wygrzewanie w temperaturze powyżej 250°C powoduje, że w lepiszczu zanika struktura sieci polimerowej a lepiszcze upływnia się.

Konsystencja mastyksu wysokogrysowego SMA/MA 8 z lepiszczem gumowo-asfaltowym o penetracji około 50 - 70 [-0,1 mm], w wyniku wygrzewania w temperaturze 200°C, znacznie wzrasta w porównaniu do konsystencji mieszanki wyjściowej (IS = 1,6). W tej temperaturze lepiszcze z dodatkiem gumy upływnia się. W zakresie temperatury 200 - 250°C następuje jednak utwardzenie mieszanki aż do wartości konsystencji mieszanki nie wygrzewanej (IS = 1,0). W zakresie temperatury 250 - 300°C konsystencja mieszanki SMA/MA 8 nie zmienia się i równa jest konsystencji mieszanki nie poddanej wygrzewaniu, co należy uznać z zjawisko korzystne, ze względu na odporność mieszanki na wysoką temperaturę technologiczną.

Mastyks wysokogrysowy SMA/MA, w odróżnieniu od asfaltu lanego MA, charakteryzuje się bardzo rozwiniętym nośnym szkieletem mineralnym. Z tego względu, zmiany właściwości lepiszcza w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury technologicznej, mają mniejszy wpływ na zmiany konsystencji SMA/MA niż w przypadku asfaltu lanego.

Tablica 4-41. Wyniki badań modułu sztywności mastyksu wysokogrysowego SMA/MA 8 do izolacji mostowych

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Moduł sztywności w temperaturze 10°C [MPa]
PmB 45/80-55	SMA/MA8_X	-	6796
	SMA/MA8_200	200	7956
	SMA/MA8_250	250	9365
	SMA/MA8_300	300	9027
Lepiszcz gumowo-asfaltowe	SMA/MA8_X	-	6725
	SMA/MA8_200	200	6556
	SMA/MA8_250	250	7201
	SMA/MA8_300	300	9928



Rys. 4-59. Indeks zmiany modułu sztywności mastyksu wysokogrysiowego SMA/MA 8 w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

Na podstawie analizy wyników badania zmian modułu sztywności IT-CY mastyksu wysokogrysiowego SMA/MA 8 stosowanego do izolacji płyty pomostu obiektu inżynierskiego przedstawionych w tabl. 4-41 i na rys. 4-59 można stwierdzić, że mieszanka SMA/MA 8 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 po wygrzaniu w temperaturze 200°C wykazuje nieznaczny wzrost modułu sztywności w porównaniu do mieszanki SMA/MA niewygrzewanej.

Analizując układ izoterm indeksu zmian modułu sztywności w zakresie temperatury wygrzewania 200 - 250°C, należy stwierdzić, że SMA/MA 8 z polimeroasfaltem wykazuje dalsze nieznaczne usztywnienie w odniesieniu do wartości usztywnienia w 200°C. Temperaturę 250°C należy uznać za temperaturę graniczną, powyżej której indeks zmian modułu sztywności mastyksu wysokogrysiowego z polimeroasfaltem stabilizuje się, osiągając wartość $IS = 1,33$.

Indeks zmiany modułu sztywności IS mastyksu wysokogrysiowego SMA/MA 8 jest korzystniejszy od indeksu IS asfaltu lanego MA 8, który w zakresie temperatury wygrzewania 250 - 300°C wzrasta osiągając wartość $IS = 1,36$.

Mastyks wysokogrysiowy SMA/MA z lepiszczem gumowo-asfaltowym w zakresie temperatur wygrzewania 200 - 250°C, nieznacznie usztywnia się. W tym zakresie temperatury mieszanka SMA/MA z lepiszczem gumowo-asfaltowym jest bardziej odporna na zmiany modułu sztywności, niż mieszanka z polimeroasfaltem. Temperaturę 250°C należy uznać za temperaturę graniczną, powyżej której indeks zmian modułu sztywności mastyksu wysokogrysiowego z lepiszczem gumowo-asfaltowym wyraźnie wzrasta, osiągając wartość $IS = 1,48$.

Oceniając wpływy wysokich temperatur technologicznych na zmianę właściwości mastyksu wysokogrysiowego SMA/MA 8 należy mieć na uwadze wzajemne oddziaływanie mieszanki mineralnej, tworzącej szkielet nośny i lepiszcza zawartego w mastyksie wysokogrysiowym. Ze względu na wysoki udział frakcji grysiowej wpływ lepiszcza jest ograniczony a odkształcalność SMA/MA jest zdecydowanie mniejsza niż w stosowanych do warstwy izolacji i warstwy ochronnej asfaltów lanych MA.

Odporność na działanie wody i mrozu próbek SMA/MA w funkcji temperatury wygrzewania

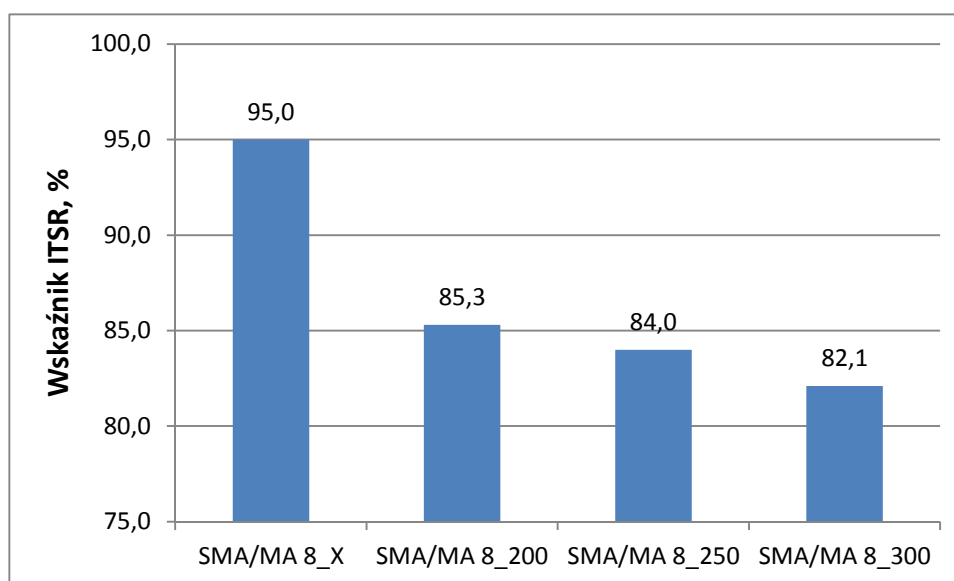
W tabl. 4-42 oraz na rys. 4-60 i 4-61 przedstawiono wyniki badania wskaźnika ITSR odporności na działanie wody i mrozu mastyksu grysowego SMA/MA 8 w funkcji temperatury wygrzewania 200, 250 i 300°C. Wskaźnik ITSR obliczono na podstawie badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek poddanych kondycjonowaniu w wodzie ITS_w oraz próbek suchych ITS_d .

Tablica 4-42. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie pośrednie SMA/MA 8 w funkcji temperatury wygrzewania

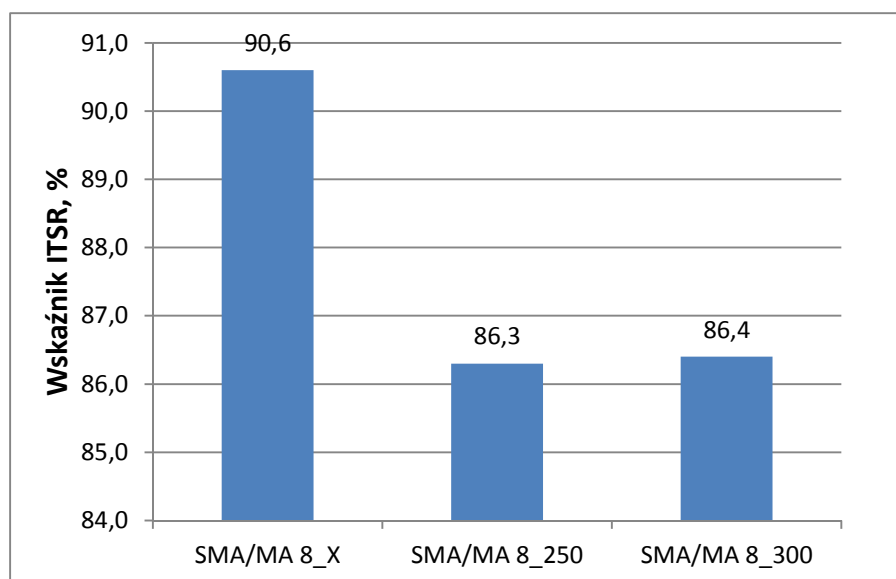
Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	ITS_w [MPa]	ITS_d [MPa]	Wskaźnik ITSR* [%]
PmB 45/80-55	SMA/MA8_X	-	0,72	0,76	95,0
	SMA/MA8_200	200	1,03	1,21	85,3
	SMA/MA8_250	250	1,22	1,45	84,0
	SMA/MA8_300	300	1,10	1,34	82,1
Lepiszcz gumowo-asfaltowe	SMA/MA8_X	-	0,86	0,95	90,6
	SMA/MA8_250	250	0,94	1,09	86,3
	SMA/MA8_300	300	1,06	1,23	86,4

* próbki zagęszczane po 35 uderzeń ubijaka na każdą stronę

Na podstawie analizy wyników wytrzymałości w rozciąganiu pośrednim ITS przedstawionych w tabl. 4-42 należy zwrócić uwagę, że wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania mieszanek SMA/MA wzrasta wartość wytrzymałości. W przypadku mieszanek z lepiszczem gumowo-asfaltowym wzrost ten jest mniejszy, co świadczy o ich dużej odporności na oddziaływanie wysokiej temperatury.



Rys. 4-60. Wskaźnik ITSR mastyksu grysowego SMA/MA 8 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 w funkcji temperatury wygrzewania



Rys. 4-61. Wskaźnik ITSR mastyksu grysowego SMA/MA 8 z lepiszczem gumowo-asfaltowym w funkcji temperatury wygrzewania

Miarodajną oceną odporności zagęszczonej mieszanki mineralno-asfaltowej na działanie wody z jednym cyklem zamrażania, jest badanie odporności na działanie wody wg PN-EN 12697-12 [N25]. Na podstawie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie zestawu „mokrego” zagęszczonych próbek i zestawu „suchego”, obliczono wskaźnik ITSR.

Na podstawie analizy wyników badania wskaźnika ITSR mastyksu wysokogrysowego SMA/MA 8 stosowanego do warstw izolacji i nawierzchni na obiekcie inżynierskim, przedstawionych w tabl. 4-42 i na rys. 4-60 i 4-61 można stwierdzić, że:

- mieszanki wyjściowe SMA/MA 8 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 oraz z lepiszczem gumowo-asfaltowym mają bardzo korzystne wysokie wartości wskaźników ITSR, powyżej 90% i spełniają wymagania WT-2: 2010;
- temperatura wygrzewania 200 do 300°C wpływa na obniżenie wskaźnika ITSR mieszanek ale jego wartość nie jest niższa niż 81%, co należy uznać za zjawisko korzystne;
- wysoka zawartość lepiszcza w próbkach SMA/MA 8 poddanych oddziaływaniu wysokiej temperatury, nie powoduje w sposób zasadniczy pogorszenia odporności mieszanek na działanie wody i mrozu.

Można stwierdzić, że mieszanka mastyksu grysowego SMA/MA 8 charakteryzuje się dobrymi właściwościami a wpływ temperatury na zmianę tych parametrów jest niewielki.

4.4 Badanie odporności na wysokie temperatury technologiczne betonu asfaltowego AC, mastyksu grysowego SMA i asfaltu lanego MA do warstwy ochronnej i warstwy ścieralnej

W celu określenia wpływu wysokiej temperatury na właściwości funkcjonalne nawierzchni mostowej przeprowadzono badania wybranych mieszanek mineralno-asfaltowych. Ocenie poddano mieszanki mineralno-asfaltowe z asfaltu lanego (MA), z mastyksu grysowego SMA oraz betonu asfaltowego (AC). Zaprojektowano mieszanki mineralno-asfaltowe do ruchu ciężkiego KR3-KR6.

4.4.1 Warstwa ochronna/warstwa ścieralna z asfaltu lanego (MA)

Według Wymagań Technicznych WT-2:2010 [N1] i projektu WT-2:2013 [N19] zaleca się wykonywanie warstwy ochronnej z mieszanki mineralno-asfaltowej typu asfalt lany MA o uziarnieniu 8 lub 11 mm. Jako lepszycze zaleca się stosowanie asfaltu drogowego 35/50 lub asfaltu wielorodzajowego 35/50. Wyeliminowanie polimeroasfaltów z warstwy ochronnej jest wynikiem niszczącego oddziaływania wysokiej temperatury na polimeroasfalt i analizy zniszczeń nawierzchni mostowych, do których stosowano asfalty lane z dodatkiem polimerów.

Autorzy przeanalizowali obowiązujące zalecenia w okresie ostatnich 50 lat, dotyczące stosowania asfaltów drogowych i polimeroasfaltów do asfaltów lanych, stosowanych do nawierzchni mostowych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy, zwrócono uwagę na znaczne zróżnicowanie zaleceń dotyczących stosowania lepiszczy oraz temperatur technologicznych asfaltu lanego i stwierdzono, że:

- norma PN-64/S-96032 [N20] z 1964 roku zalecała stosowanie do asfaltu lanego zwykłych asfaltów drogowych D20, D35 i D50 i temperatury technologicznej asfaltu lanego nie przekraczającej 180°C. Taka temperatura nie powodowała w najmniejszym stopniu degradacji asfaltu lanego;
- norma BN-70/8934-10 „Drogi samochodowe. Typowe nawierzchnie asfaltowe na mostach drogowych” [N21] z 1970 roku zalecała stosowanie jako izolacji mastyksu a jako warstwy ścieralnej asfaltu lanego. Do mastyksu zalecano asfaltu rodzaju D50 w ilości 12-16%. Temperatura wytwarzania mastyksu 170-180°C. Do warstwy ścieralnej przewidywano stosowanie drobnoziarnistego asfaltu lanego a do warstwy ochronnej – średnioziarnisty asfalt lany (z możliwie dużą ilością ziaren kruszywa grubego);
- norma PN-S-96025 [N22] z 2000 roku zalecała stosowanie polimeroasfaltów do asfaltu lanego ale nie określała minimalnej i maksymalnej temperatury mieszanki mineralno-asfaltowej i pozostawiała tę kwestię do uzgodnienia z producentem lepiszcza;
- instrukcja „Wykonywania izolacji z pap zgrzewalnych i nawierzchni asfaltowych na drogowych obiektach mostowych” z 2005 roku [38] zaleca przy układaniu asfaltu lanego, nie przekraczanie temperatury 250°C;
- Wymagania Techniczne WT-2 z 2008 [N23] roku zalecały stosowanie polimeroasfaltów do asfaltu lanego do warstwy ochronnej nawierzchni mostowej. Najwyższą temperaturę mieszanki mineralno-asfaltowej asfaltu lanego z polimeroasfaltami określano na 230°C;
- W WT-2 z 2010 roku [N1] uwzględniono krytyczne uwagi producentów i środowisk drogowych dotyczące wysokich temperatur technologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych z polimeroasfaltami. Wymagania te ostatecznie zostały skorygowane i zamieszczone w WT-2 z 2013 roku [N19]. Zgodnie z ostatnimi wytycznymi do asfaltu lanego do warstwy ochronnej można stosować wyłącznie asfalty niemodyfikowane, tj. asfalt drogowy 35/50 oraz asfalt wielorodzajowy 35/50. Dla tych lepiszczy wysokie temperatury wytwarzania mieszanek rzędu 200-240°C nie powinny wpływać destrukcyjnie na właściwości asfaltu. Wytyczne WT-2: 2013 nie przewidują stosowania do warstwy ścieralnej asfaltu lanego.

Producenci polimerów, stosowanych do modyfikacji asfaltów zalecają wytwarzanie polimeroasfaltów w temperaturach do 200°C a około 2 godzinne podwyższenie temperatury do około 220°C nie powinno wpływać destrukcyjnie na właściwości lepiszcza i mieszanki mineralno-asfaltowej.

W literaturze dotyczącej wbudowywania warstw asfaltu lanego na izolacji z papy termozgrzewalnej, zwraca się uwagę, że w czasie układania gorącej mieszanki asfaltu lanego, asfalt w izolacji rozpuszcza się i wnika w warstwę asfaltu lanego. W wyniku zaistnienia tego zjawiska zostaje zmniejszona grubość warstwy izolacyjnej [10].

W celu określenia wpływu wysokiej temperatury technologicznej na właściwości nawierzchni mostowej zaprojektowano mieszankę mineralno-asfaltową typu asfalt lany (MA) o uziarnieniu 11 mm (MA 11) kategorii ruchu KR3-KR6 zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1].

Wymagania odnośnie asfaltu lanego MA

Wymagania dotyczące mieszanek mineralno-asfaltowych typu asfalt lany (tabl. 4-43 i 4-44) określa norma PN-EN 13108-6 [N8] oraz WT-2 2010 [N1], gdzie podane są podstawowe klasyfikacyjne wymagania.

Tablica 4-43. Uziarnienie mieszanki mineralnej i zawartość lepiszcza do asfaltu lanego do warstwy ścieralnej lub wiążącej wg WT-2:2010

Właściwość	Przesiew, [% (m/m)]					
	MA 5 KR1÷6		MA 8 KR1÷6		MA 11 KR1÷6	
Wymiar sita #, [mm]	od	do	od	do	od	do
16	-	-	-	-	100	-
11,2	-	-	100	-	90	100
8	100	-	90	100	70	85
5,6	90	100	70	90	-	-
2	55	65	50	60	45	55
0,125	27	42	25	40	22	35
0,063	24,0	32,0	22,0	30,0	20,0	28,0
Zawartość lepiszcza	$B_{\min 6,8}$		$B_{\min 6,8}$		$B_{\min 6,5}$	

Tablica 4-44. Wymagane właściwości asfaltu lanego do warstw ścieralnej i wiążącej nawierzchni mostowych, KR1÷6 wg WT-2:2010

Właściwość	Metoda badania	Wymaganie w zależności od kategorii ruchu	
		KR1÷2	KR3÷6
Odporność na deformacje trwałe	PN-EN 13108-20 (D.5.1)	$I_{\min} 1,0$	$I_{\min} 1,0$
		$I_{\max} 4,0$	$I_{\max} 3,0$
		$I_{nc} 0,6$	$I_{nc} 0,4$

Materiały

Do mieszanki mineralno-asfaltowej typu asfalt lany zastosowano następujące materiały:

- wypełniacz dodany - mączka wapienna Wolica,
- piasek niełamany frakcji 0,063/2,
- piasek łamany frakcji 0/0,063 mm, z otoczków Paczków,
- grys frakcji 2/5 mm, gabro Słupiec,
- grys frakcji 5/8 mm, gabro Słupiec,
- grys frakcji 8/11 mm, gabro Słupiec,
- lepiszcza:
 - PmB 45/80-55,
 - 35/50,
 - 35/50 + 2,0% (m/m) asfaltu naturalnego.

Badania materiałów kamiennych – uziarnienie

W celu ustalenia optymalnego składu mieszanki mineralnej wykonano oznaczenie składu ziarnowego materiałów kamiennych zgodnie z normą PN-EN 933-1 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania” [N10]. Poszczególne kruszywa przesiewano przez normowy zestaw sit (zestaw podstawowy +1), metodą „na sucho”. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego poszczególnych kruszyw przedstawiono w tabl. 4-45.

Tablica 4-45. Skład ziarnowy materiałów kamiennych do asfaltu lanego MA

Wymiar boku kwadratowego oczka sita [mm]	Zawartość ziaren pozostających na sicie [%]					
	Mączka wapienna Wolica	Piasek niełamany 0,063/2	Piasek łamany z otoczek Paczków 0,063/2	Grys gablo Słupiec 2/5	Grys gablo Słupiec 5/8	Grys gablo Słupiec 8/11
45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,1
8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	78,6
5,6	0,0	0,0	0,0	1,1	60,7	7,6
4,0	0,0	0,0	0,2	30,9	25,2	0,3
2,0	0,0	1,5	12,9	58,6	4,3	0,1
1,0	0,0	8,0	34,6	6,2	1,0	0,0
0,5	0,0	19,1	27,7	1,1	0,2	0,0
0,25	0,0	44,0	15,8	0,4	0,2	0,0
0,125	1,0	24,1	6,2	0,3	0,2	0,0
0,063	16,1	3,0	1,6	0,3	0,1	0,0
< 0,063	82,9	0,3	1,0	1,2	0,3	0,1
Σ	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Uziarnienie wypełniacza dodanego mieści się w granicach wymagań od 70 – 100% ziaren przechodzących przez sito 0,063 mm. Piaski oraz grysy mają uziarnienia w granicach nie przekraczających wymagań wg WT-1:2010 [N1] dotyczących asfaltów lanych.

Badania materiałów kamiennych – gęstość

Oznaczenie gęstości materiałów kamiennych zostało wykonane metodą piknometryczną wg PN-EN 1097-6 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości” [N12] i PN-EN 1097-7 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna” [N13]. Metoda polega na obliczeniu ilorazu masy ziaren i ich objętości, określonej za pomocą piknometru. Wyniki oznaczenia przedstawia tabl. 4-46.

Tablica 4-46. Gęstości kruszyw i wypełniacza

Rodzaj kruszywa	Gęstość, [g/cm ³]
Grys gabro Słupiec 8/11	2,991
Grys gabro Słupiec 5/8	2,975
Grys gabro Słupiec 2/5	2,962
Piasek łamany z otoczków Paczków	2,651
Piasek niełamany	2,654
Mączka wapienna Wolica	2,700

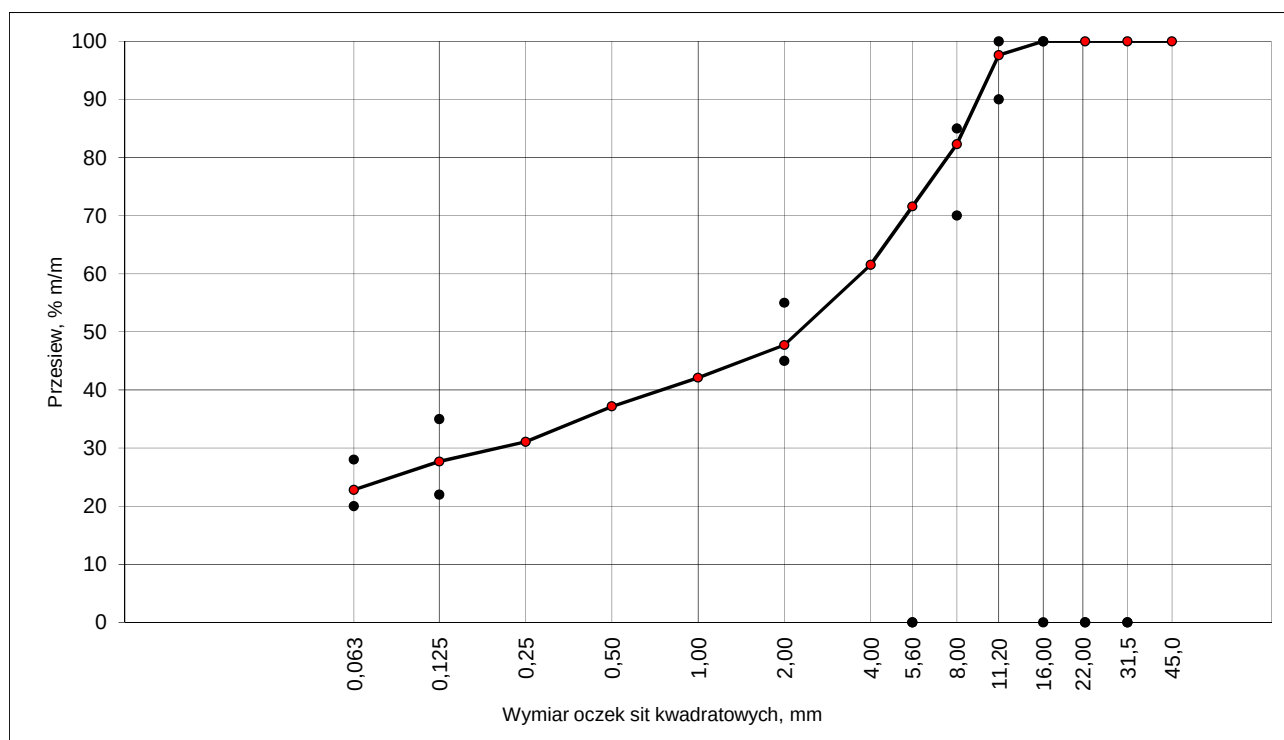
Gęstość kruszyw wykorzystano do ustalania współczynnika korygującego zawartość lepiszcza wg WT-2: 2010.

Ustalenie składu mieszanki mineralno-asfaltowej asfalt lany

Mieszanke mineralno-asfaltową typu asfalt lany zaprojektowano zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010.

Zaprojektowano 2 rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych typu MA 11, zróżnicowanych pod względem rodzaju lepiszcza, wykorzystując uziarnienie mieszanki mineralnej i zawartość lepiszcza dla asfaltu lanego do warstwy ścieralnej i wiążącej kategorii ruchu KR1 do KR6.

Krzywa uziarnienia zaprojektowanej mieszanki mineralnej do asfaltu lanego MA 11 przedstawiono odpowiednio na rys. 4-62. Ostateczny skład mieszanki mineralno-asfaltowej typu asfalt lany MA 11 przedstawiono w tabl. 4-47.



Rys. 4-62. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej do asfaltu lanego MA 11

Krzywa uziarnienia MA 11 mieści się między punktami kontrolnymi. Skład ziarnowy MA projektowano z uwzględnieniem zwiększonej odporności na odkształcenia trwałe.

Tablica 4-47. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej (mma) typu MA 11

Składniki mma	Skład mma [%]
Lepiszczce	7,5
Mączka wapienna Wolica	25,0
Piasek niełamany	9,3
Piasek łamany z otoczków Paczków	9,3
Grys gablo Słupiec 2/5	18,5
Grys gablo Słupiec 5/8	13,9
Grys gablo Słupiec 8/11	16,7
	100,0

Do mieszanek asfaltu lanego zastosowano twarde asfalty drogowe oraz polimeroasfalty. Ze względu na urabialność mieszanki, konieczne było zwiększenie dla wszystkich rodzajów asfaltu lanego zawartości lepiszcza do 7,5 % (m/m). Ponadto, również w celu poprawy urabialności mieszanki MA 11, zastosowano piasek niełamany w ilości 9,3 % (m/m).

Program badań asfaltu lanego

Mieszanki mineralno-asfaltowe stosowane do wykonywania warstw nawierzchni mostowych, podczas produkcji, transportu i układania mogą być narażone na oddziaływanie wysokich temperatur, przewyższających temperatury wymagane procesami technologicznymi. Dodatkowo, warstwa ochronna z mma (np. asfalt lany) jest ponownie rozgrzewana po ułożeniu na jej powierzchni gorącej warstwy ścieralnej o temperaturze 160-230°C. Oddziaływanie wysokiej temperatury powyżej 200°C może

powodować zmianę właściwości lepiszczy a tym samym zmianę właściwości lepkością mieszank mineralno-asfaltowych.

W celu określenia odporności na wysokie temperatury przy wytwarzaniu, transporcie i układaniu mieszank mineralno-asfaltowych, luźną mieszankę asfaltu lanego (MA) poddano wygrzewaniu w temperaturze: 200, 250 i 300°C w warstwie około 50 mm. Czas wygrzewania wynosił 1 godzinę. Po procesie wygrzewania zaformowano próbki sześciennie 70×70 mm i próbki cylindryczne Marshalla Ø 100 mm zgodnie z PN-EN 12697-20.

Próbki asfaltu lanego zostały wykonane z polimeroasfaltem PmB 45/80-55, asfaltem drogowym 35/35 oraz asfaltem 35/50 z 2% dodatkiem asfaltu naturalnego Trinidad.

W celu oceny zmian właściwości asfaltu lanego pod wpływem wysokiej temperatury 200, 250 i 300 °C wykonano badania penetracji stemplem (twardości) oraz badania modułu sztywności próbek MA nie wygrzewanych oraz poddanych wygrzewaniu.

Szczegółowy program badań asfaltu lanego do warstw nawierzchni mostowych przedstawiono poniżej:

- pomiar penetracji stemplem w temperaturze 40°C wg PN-EN 12697-20 [N14],
- pomiar modułu sztywności w rozciąganiu pośrednim w temperaturze 10°C, metoda IT-CY wg PN-EN 12697-26 [N15].

Badanie penetracji stemplem oraz badanie modułu sztywności IT-CY mieszanki mineralno-asfaltowej opisano szczegółowo w punkcie 4.3.1.

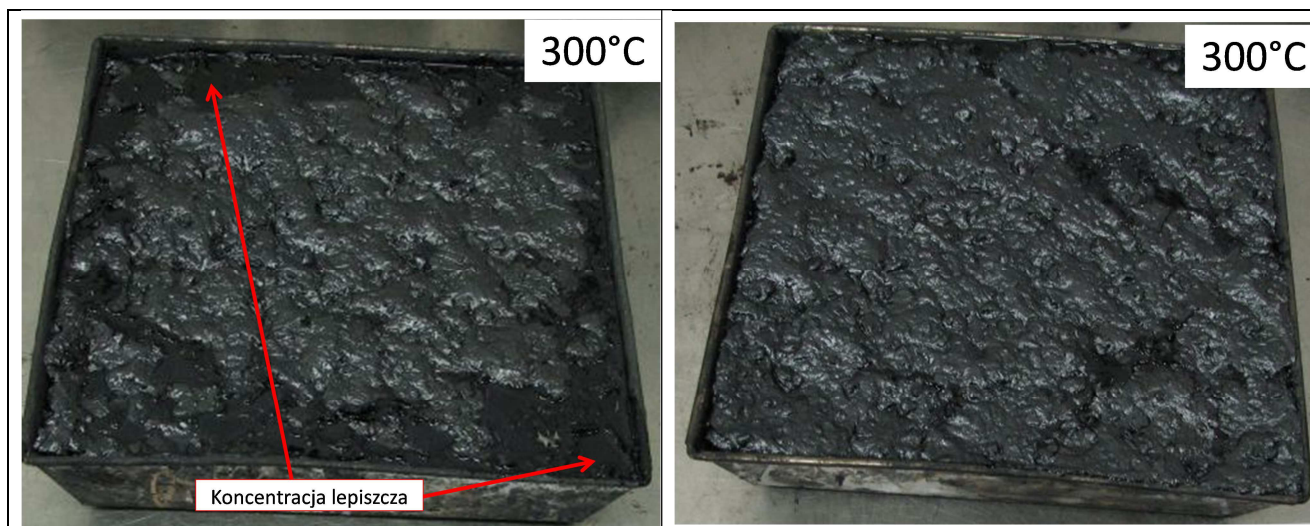
Wyniki badań asfaltu lanego

Wyniki badań właściwości asfaltu lanego do nawierzchni mostowych niewygrzewanego (oryginalnego) oraz wygrzewanego w temperaturze 200, 250 i 300°C przedstawiono w tabl. 4-48 oraz 4-49.

Zmiany powierzchni próbek po procesie wygrzewania pokazano na rys. 4-63 i 4-64.

Na rys. 4-65 przedstawiono w formie graficznej indeksy zmiany twardości mastyksu (IS) określone na podstawie pomiarów penetracji stemplem a na rys. 4-66 indeksy zmiany modułu sztywności w funkcji temperatury wygrzewania 200, 250 i 300°C.

Indeks zmiany twardości (IS pen. stemplem) obliczono na podstawie wzoru (9) a indeks zmiany modułu sztywności (IS modułu szt.) obliczono na podstawie wzoru (10). Wzory przedstawiono w punkcie 4.3.1.



Rys. 4-63. Asfalt lany MA 11 z asfaltem 35/50 wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 300°C

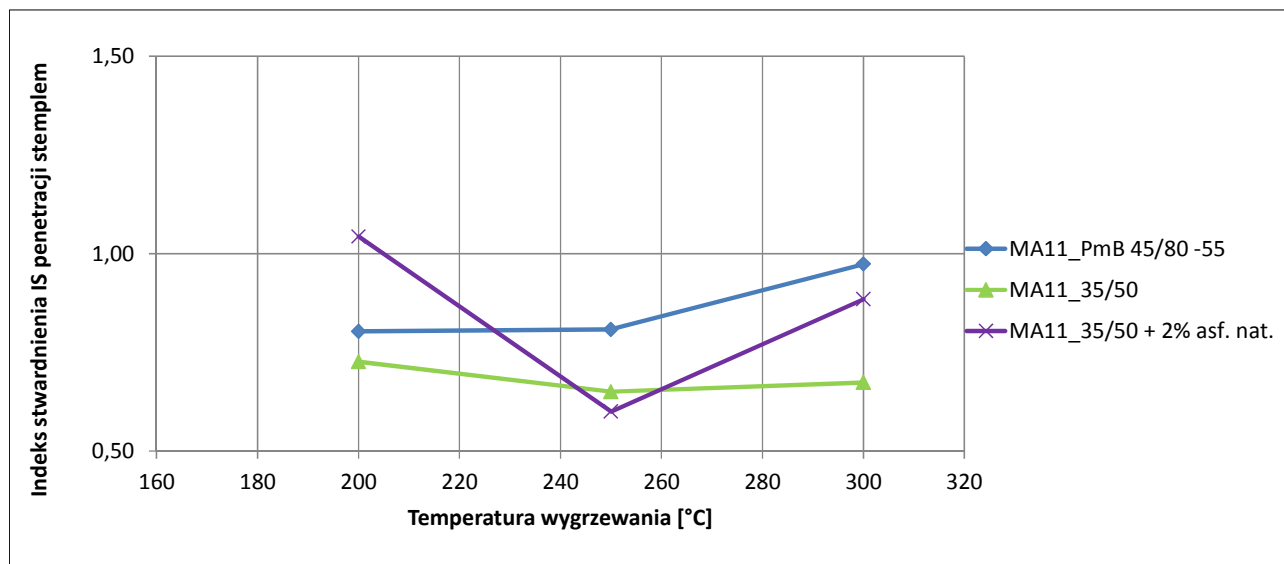
Rys. 4-64. Asfalt lany MA 11 z asfaltem 35/50+2% asfaltu naturalnego wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 300°C

Na podstawie oceny wizualnej powierzchni luźnej mieszanki asfaltu lanego MA 11 z asfaltem 35/50 poddanej wygrzewaniu przez 1 godzinę, w temperaturze 300°C, stwierdzono segregację mieszanki (rys 4-63). W wyniku oddziaływania wysokiej temperatury asfalt 35/50 częściowo spłynął z ziaren mieszanki mineralnej, tworząc liczne koncentracje. Takie zjawisko nie występuje w przypadku asfaltu lanego z asfaltem 35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego. Asfalt naturalny poprawia stabilność mieszanki mineralno-asfaltowej, ograniczając spływanie lepiszcza w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury technologicznej (rys 4-64).

Przed zaformowaniem próbek, mieszanka MA po wygrzewaniu została ujednoliconą.

Tablica 4-48. Wyniki badań penetracji stemplem asfaltu lanego MA 11 do izolacji mostowych

Rodzaj lepizsza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Zagłębienie trzpienia w [mm] odczytane po czasie badania:						
			1 minuta	2 minuta	4 minuta	8 minuta	15 minuta	30 minuta	60 minuta
PmB 45/80-55	MA11_X	-	2,02	2,39	2,82	3,26	3,72	4,17	4,58
	MA11_200	200	1,76	2,07	2,36	2,71	3,01	3,35	3,67
	MA11_250	250	1,60	1,91	2,25	2,61	2,97	3,37	3,77
	MA11_300	300	2,01	2,41	2,79	3,24	3,62	4,06	4,53
35/50	MA11_X	-	2,05	2,54	3,15	3,87	4,63	5,55	6,62
	MA11_200	200	1,70	2,08	2,51	3,00	3,46	4,03	4,69
	MA11_250	250	1,62	1,98	2,37	2,78	3,15	3,61	4,07
	MA11_300	300	1,68	2,03	2,43	2,89	3,30	3,74	4,18
35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego	MA11_X	-	1,68	2,11	2,60	3,16	3,76	4,60	5,39
	MA11_200	200	1,80	2,22	2,74	3,33	3,99	4,80	5,64
	MA11_250	250	1,11	1,36	1,67	2,01	2,38	2,76	3,19
	MA11_300	300	1,91	2,32	2,78	3,24	3,63	4,07	4,52



Rys. 4-65. Indeks zmiany twardości (penetracja stemplem po 30 minutach badania) asfaltu lanego MA 11 w funkcji temperatury wygrzewania

Na podstawie analizy wyników badań zmian twardości asfaltu lanego MA 11 do warstw nawierzchni mostowych zestawionych w tabl. 4-48 i na rys. 4-65 można stwierdzić, że penetracja stemplem asfaltu lanego z polimeroasfalem zmniejsza się w wyniku oddziaływania temperatury 200°C i utrzymuje się na podobnym poziomie w zakresie temperatury 200-250°C. W mieszance MA 11 wygrzewanej w temperaturze 300°C następuje wzrost penetracji, związany najprawdopodobniej z degradacją sieci polimerowej polimeroasfaltu.

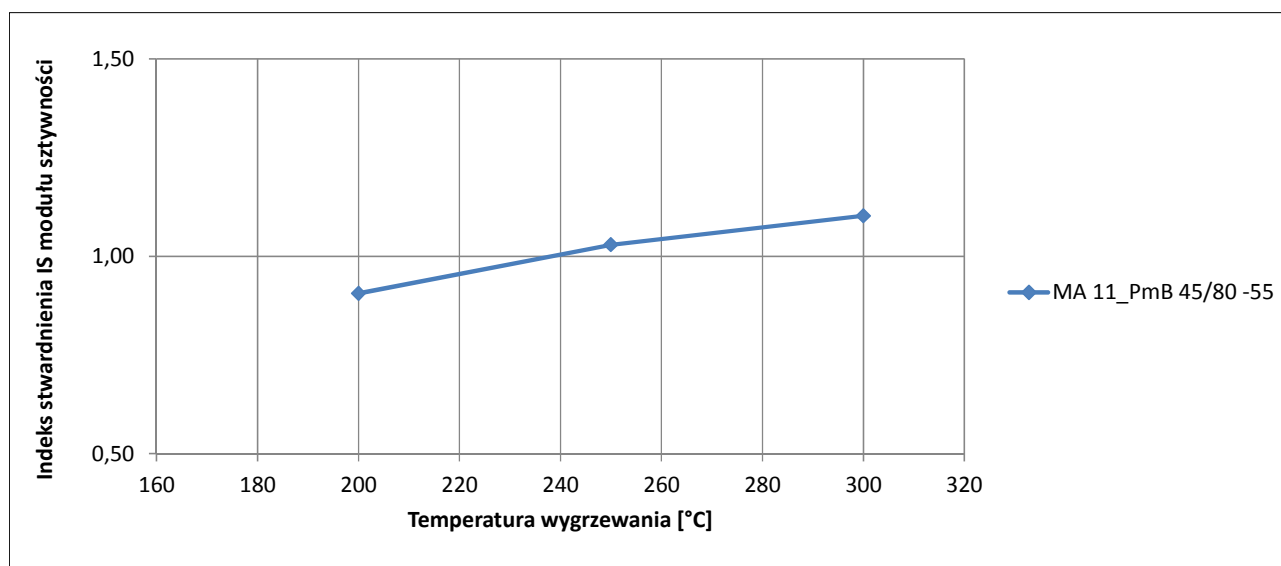
Asfalt lany MA 11 z asfaltem 35/50 w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury technologicznej utwardza się, najprawdopodobniej wskutek zmiany składu grupowego lepiszcza i częściowego przejścia żywic w asfalteny. W zakresie temperatur 200-300°C indeks stwardnienia mieszanki pozostaje na podobnym poziomie ($IS = \text{około } 0,7$).

Odmienny od powyższych charakter zmian penetracji asfaltu lanego MA 11 wykazuje mieszanka z asfaltem 35/50 i dodatkiem asfaltu naturalnego. W mieszance MA wygrzewanej w temperaturze 200°C, nieznacznie wzrasta penetracja w porównaniu do mieszanki niewygrzewanej. Największą zmianę penetracji stwierdzono jednak w zakresie temperatury 200-250°C. W zakresie tym, indeks stwardnienia mieszanki zmienia się od wartości $IS = 1,05$ do wartości $IS = 0,6$. Następuje znaczne utwardzenie asfaltu lanego. W zakresie temperatury 250-300°C można zauważyć zjawisko odwrotne. Indeks stwardnienia IS wzrasta a jego wartość zbliża się do wartości IS mieszanki nie wygrzewanej, co jest spowodowane upłynniającym działaniem asfaltu naturalnego Trinidad w wysokiej temperaturze technologicznej.

Należy zauważyć, że w każdej z temperatur wygrzewania asfaltu lanego MA 11, bez względu na rodzaj zastosowanego lepiszcza, indeksy stwardnienia mają wartości zbliżone lub znacznie niższe od wartości indeksu stwardnienia asfaltu lanego nie poddanego wygrzewaniu. Powodem tego zjawiska może być rozwinięty szkielet mineralny mieszanki MA 11, odporny na trwałe odkształcenia wysokotemperaturowe, nawet w przypadku upłynnienia lepiszcza.

Tablica 4-49. Wyniki badań modułu sztywności asfaltu lanego MA 11 do izolacji mostowych

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Moduł sztywności w temperaturze 10°C [MPa]
PmB 45/80-55	MA11_X	-	4958
	MA11_200	200	4490
	MA11_250	250	5103
	MA11_300	300	5466



Rys. 4-66. Indeks zmiany modułu sztywności asfaltu lanego MA 11 w funkcji temperatury wygrzewania

Na podstawie analizy wyników badań zmian modułu sztywności asfaltu lanego MA 11 do warstw nawierzchni mostowych zestawionych w tabl. 4-49 i na rys. 4-66 można stwierdzić, że wyniki badania modułu sztywności asfaltu lanego z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 wykazują, małe zróżnicowanie wyników badań, co oznacza że oddziaływanie wysokiej temperatury wpływa w małym stopniu na sztywność asfaltu lanego MA 11. Asfalt lany zawiera mniej lepiszcza a więcej kruszywa grubego niż mastyks tradycyjny, dlatego efekt destrukcji właściwości sprężystych polimeroasfaltu nie jest tak widoczny.

4.4.2 Warstwa ochronna/warstwa ściernala z mastyksu grysowego (SMA)

Zaprojektowano mieszankę mineralno-asfaltową typu mastyks grysowy (SMA) o uziarnieniu 8 mm (SMA8) kategorii ruchu KR3-KR6 wykorzystując wymagania odnośnie uziarnienia dla mieszanki SMA, zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1]. Projektując mieszankę mineralną typu SMA, kierowano się zasadą uzyskania jak największej szczelności mieszanki, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej zawartości frakcji grysowej powyżej 70%. W celu zapewnienia wysokiej szczelności zagęszczanej mieszanki SMA, zaprojektowano podwyższoną zawartość kruszyw drobnych.

Wymagania odnośnie mastyksu grysowego SMA

Wymagania dotyczące mieszanek mineralno-asfaltowych typu mastyks grysowy SMA (tabl. 4-50, 4-51 i 4-52) określa norma PN-EN 13108-5 [N24] oraz WT-2: 2010 PN-EN 13108-5 [N1], gdzie podane są podstawowe klasyfikacyjne wymagania.

Tablica 4-50. Uziarnienie mieszanki mineralnej, zawartość asfaltu i środka stabilizującego mastyksu grysowego SMA wg WT-2: 2010

Właściwość	Przesiew, [% (m/m)]					
	SMA 5 KR3÷4		SMA 8 KR3÷6		SMA 11 KR3÷6	
Wymiar sita #, [mm]	od	do	od	do	od	do
16	-	-	-	-	100	-
11,2	-	-	100	-	90	100
8	100	-	90	100	50	65
5,6	90	100	35	60	35	45
2	30	40	20	30	20	30
0,125	10	19	9	17	9	17
0,063	7	12	7	12	8	12
Zawartość środka stabilizującego, [% (m/m)]	0,3	1,5	0,3	1,5	0,3	1,5
Zawartość lepiszcza	$B_{\min 7,2}$		$B_{\min 7,0}$		$B_{\min 6,4}$	

Tablica 4-51. Wymagane właściwości mastyksu grysowego SMA do kategorii ruchu KR 3-4 wg WT-2: 2010

Właściwość	Warunki zagęszczania wg PN-EN 13108-20	Metoda i warunki badania	SMA 5	SMA 8	SMA 11
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.2, ubijanie, 2 × 50 uderzeń	PN-EN 12697-8, p. 4	$V_{min\ 1,5}$ $V_{max\ 3,0}$	$V_{min\ 1,5}$ $V_{max\ 3,0}$	$V_{min\ 1,5}$ $V_{max\ 3,0}$
Odporność na deformacje trwałe ^{a)}	C.1.20, wałowanie, $P_{98}-P_{100}$	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 60°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR\ 0,5}$ $PRD_{AIRDeklarowane}$	$WTS_{AIR\ 0,5}$ $PRD_{AIRDeklarowane}$	$WTS_{AIR\ 0,5}$ $PRD_{AIRDeklarowane}$
Odporność na działanie wody	C.1.1, ubijanie, 2 × 35 uderzeń	PN-EN 12697-12, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania ^{b)} , badanie w 25°C	$ITSR_{90}$	$ITSR_{90}$	$ITSR_{90}$
Spływność lepiszcza	-	PN-EN 12697-18, p. 5	$D_{0,3}$	$D_{0,3}$	$D_{0,3}$
^{a)} Grubość płyty: SMA5 25 mm, SMA8 40 mm, SMA11 40 mm					
^{b)} Ujednoliconą procedurę badania odporności na działanie wody z jednym cyklem zamrażania podano w załączniku 1					

Tablica 4-52. Wymagane właściwości mastyksu grysowego SMA do kategorii ruchu KR 5-6 wg WT-2: 2010

Właściwość	Warunki zagęszczania wg PN-EN 13108-20	Metoda i warunki badania	SMA 8	SMA 11
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.2, ubijanie, 2 × 50 uderzeń	PN-EN 12697-8, p. 4	$V_{min\ 2,0}$ $V_{max\ 3,5}$	$V_{min\ 2,0}$ $V_{max\ 3,5}$
Odporność na deformacje trwałe ^{a)}	C.1.20, wałowanie, $P_{98}-P_{100}$	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 60°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR\ 0,3}$ $PRD_{AIRDeklarowane}$	$WTS_{AIR\ 0,3}$ $PRD_{AIRDeklarowane}$
Odporność na działanie wody	C.1.1, ubijanie, 2 × 35 uderzeń	PN-EN 12697-12, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania ^{b)} , badanie w 25°C	$ITSR_{90}$	$ITSR_{90}$
Spływność lepiszcza	-	PN-EN 12697-18, p. 5	$D_{0,3}$	$D_{0,3}$
^{a)} Grubość płyty: SMA8 40 mm, SMA11 40 mm				
^{b)} Ujednoliconą procedurę badania odporności na działanie wody z jednym cyklem zamrażania podano w załączniku 1				

Materiały

Do mieszanek mineralno-asfaltowych typu mastyks grysowy zastosowano następujące materiały:

- wypełniacz dodany - mączka wapienna Wolica,
- piasek łamany frakcji 0/0,063 mm, z otoczków Paczków,
- grys frakcji 2/5 mm, gabro Słupiec,
- grys frakcji 5/8 mm, gabro Słupiec,
- stabilizator mastyksu – włókno celulozowe,
- lepiszcze:
 - PmB 45/80-55.

Badania materiałów kamiennych – uziarnienie

W celu ustalenia optymalnego składu mieszanki mineralnej wykonano oznaczenie składu ziarnowego materiałów kamiennych zgodnie z normą PN-EN 933-1 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania” [N10]. Poszczególne kruszywa przesiewano przez normowy zestaw sit (zestaw podstawowy +1), metodą „na sucho”. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego poszczególnych kruszyw przedstawiono w tabl. 4-53.

Tablica 4-53. Skład ziarnowy materiałów kamiennych do mastyksu grysowego SMA

Wymiar boku kwadratowego oczka sita [mm]	Zawartość ziaren pozostających na sicie [%]			
	Mączka wapienna Wolica	Piasek łamany z otoczków Paczków 0,063/2	Grys gablo Słupiec 2/5	Grys gablo Słupiec 5/8
45,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,2	0,0	0,0	0,0	0,6
8,0	0,0	0,0	0,0	8,9
5,6	0,0	0,0	5,5	65,3
4,0	0,0	0,0	42,5	20,0
2,0	0,0	5,9	45,6	3,4
1,0	0,0	26,9	4,4	0,9
0,5	0,0	32,7	0,9	0,1
0,25	0,2	21,0	0,2	0,1
0,125	2,7	8,6	0,2	0,2
0,063	18,6	2,9	0,7	0,5
< 0,063	78,7	2,0	0,0	0,0
Σ	100,0	100,0	100,0	100,0

Uziarnienie wypełniacza mieści się w granicach wymagań od 70 – 100% ziaren przechodzących przez sito 0,063 mm. Piaski oraz grys mają uziarnienia w granicach nie przekraczających wymagań wg WT-1:2010 dotyczących mieszanek SMA.

Badania materiałów kamiennych – gęstość

Oznaczenie gęstości materiałów kamiennych zostało wykonane metodą piknometryczną wg PN-EN 1097-6 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości” [N12] i PN-EN 1097-7 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna” [N13]. Metoda polega na obliczeniu ilorazu masy ziaren i ich objętości, określonej za pomocą piknometru. Wyniki oznaczenia przedstawia tabl. 4-54.

Tablica 4-54. Gęstości kruszyw i wypełniacza

Rodzaj kruszywa	Gęstość, [g/cm ³]
Grys gabra Słupiec 5/8	2,972
Grys gabra Słupiec 2/5	2,994
Piasek łamany z otoczków Paczków	2,703
Mączka wapienna Wolica	2,700

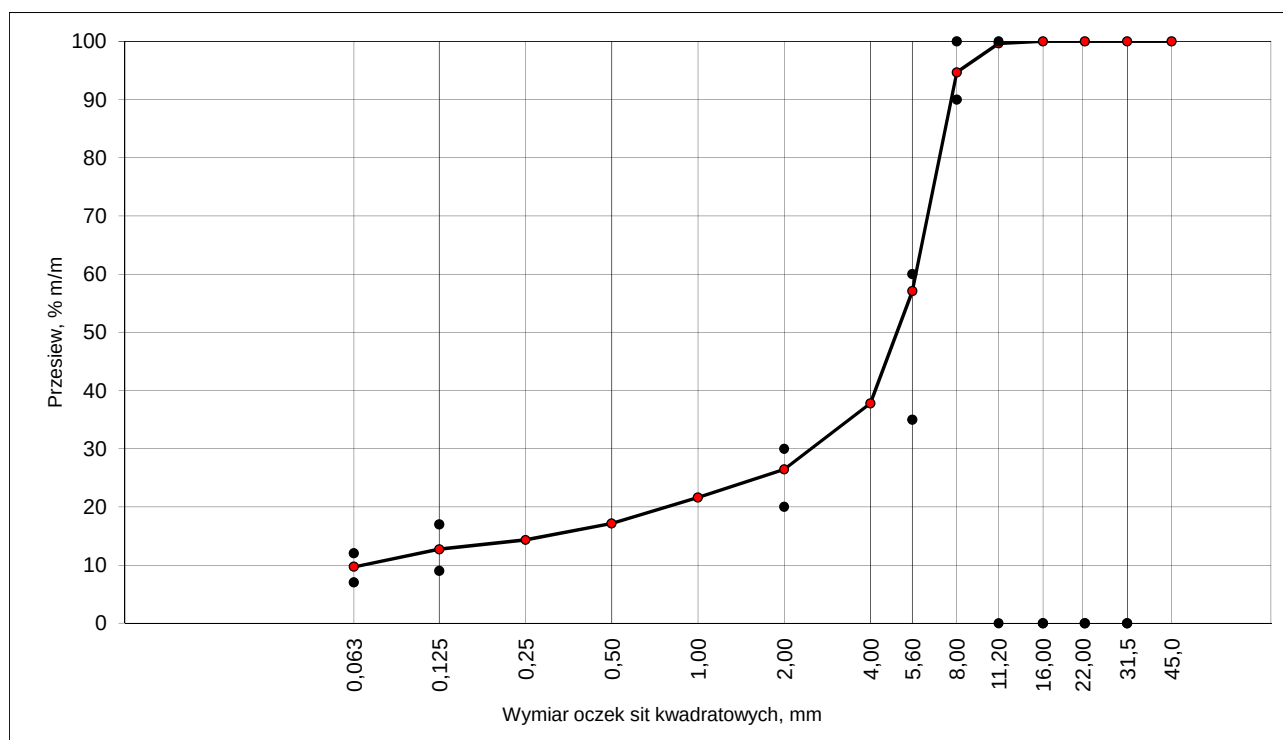
Gęstość kruszyw wykorzystano do ustalania współczynnika korygującego zawartość lepiszcza wg WT-2: 2010.

Ustalenie składu mieszanki mineralno-asfaltowej typu SMA

Projekt mieszanki mineralnej

Mieszanke mineralno-asfaltową typu mastyks grysowy SMA zaprojektowano wykorzystując wymagania zgodne z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1]. Zaprojektowano jeden rodzaj mieszanki mineralno-asfaltowej typu SMA 8, dla kategorii ruchu KR3 do KR6.

Krzywą uziarnienia zaprojektowanej mieszanki mineralnej do mastyksu grysowego SMA 8 przedstawiono na rys. 4-67.



Rys. 4-67. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej do mastyksu grysowego SMA 8

Ustalenie zawartości stabilizatora mastyksu – badanie spływności

W celu obliczenia optymalnej ilości stabilizatora mastyksu przeprowadzono badanie spływności mastyksu metodą Schellenberga, zgodnie z PN-EN 12697-18 [N15] a wyniki badania przedstawiono w tabl. 4-55.

Tablica 4-55. Spływność mastyksu mieszanki SMA 8

Zawartość stabilizatora, [%]	Spływność, [%]
0,3	0,13
0,4	0,05
0,5	0,04

Przyjmuje się, że optymalna zawartość stabilizatora mastyksu w mieszance mineralno-asfaltowej pozwala na uzyskanie spływności metodą Schellenberga nie większą niż 0,30% (0,28 – 0,30%) w stosunku do masy mieszanki mineralno-asfaltowej. Na podstawie otrzymanych wyników badań spływności mastyksu stwierdzono, że zaprojektowany skład SMA charakteryzuje się korzystną niską spływnością. Przyjęto standardową ilość stabilizatora 0,3% (m/m).

Ustalenie zawartości wolnej przestrzeni w mieszance typu SMA

W celu zaprojektowania optymalnego składu SMA, przeprowadzono badania gęstości mieszanki mineralno-asfaltowej SMA wg PN-EN 12697-5 [N16] i gęstości objętościowej zagęszczonej mieszanki SMA wg PN-EN 12697-6 [N17]. Próbkę SMA zagęszczano po 50 uderzeniach ubijaka Marshalla na każdą stronę próbki. Na podstawie uzyskanych wyników badań obliczono zawartość wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach zgodnie z PN-EN 12697-8 [N18]. Wyniki badań gęstości i gęstości objętościowej mieszanki mineralno-asfaltowej oraz obliczone zawartości wolnej przestrzeni SMA 8 przedstawiono w tabl. 4-56.

Tablica 4-56. Gęstości oraz zawartość wolnych przestrzeni mieszanki SMA 8

Oznaczenie próbki	Zawartość asfaltu w próbkach	Gęstość objętościowa mma	Gęstość mma	Zawartość wolnej przestrzeni w próbkach mma*
	[%]	[kg/m³]	[kg/m³]	[%]
SMA8_nr 1	7,0	2507	2571	2,5
SMA8_nr 2		2502	2571	2,7
SMA8_nr 3		2504	2571	2,6
Średnia:				2,6

* próbki zagęszczane po 50 uderzeń ubijaka na każdą stronę

Na podstawie uzyskanych wyników badań zawartości wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach SMA stwierdzono, że zaprojektowany skład mieszanki mineralnej oraz przyjęta zawartość lepiszcza pozwalają na uzyskanie optymalnej zawartości wolnej przestrzeni, na poziomie około 2,6 % (m/m), co powinno zapewnić dużą szczelność warstwy ochronnej lub ścieralnej nawierzchni mostowej.

Ostateczny skład mieszanek mineralno-asfaltowych

Ostateczny skład mieszanek mineralno-asfaltowych typu SMA 8 przedstawiono w tabl. 4-57.

Tablica 4-57. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej (mma) typu SMA 8

Składniki mma	Skład mma [%]
Lepiszczce	7,0
Mączka wapienna Wolica	11,2
Piasek łamany z otoczków Paczków	12,1
Grys gabra Słupiec 2/5	17,7
Grys gabra Słupiec 5/8	52,1
	100,0

Idea projektowania nawierzchni z mastyksu grysowego polega na założeniu, że szkielet grysowy klinujących się ziaren, zapewni odporność na deformacje trwałe warstw SMA o grubości około 2,5 cm do 4,0 cm, nawet przy dużej zawartości lepiszcza. W zaprojektowanym składzie, łączna zawartość frakcji grysowej wynosi 70%. Ze względu na konieczność uzyskania szczelnej mieszanki mineralno-asfaltowej, co ma szczególne znaczenie w przypadku nawierzchni mostowych, przyjęto zawartość lepiszcza 7,0% (m/m).

Program badań mastyksu grysowego

W celu określenia odporności na wysokie temperatury przy wytwarzaniu, transporcie i układaniu mieszanek mineralno-asfaltowych, luźną mieszankę mastyksu wysokogrysowego (SMA/MA) poddano wygrzewaniu w temperaturze: 200, 250 i 300°C w warstwie około 50 mm. Czas wygrzewania wynosił 1

godzinę. Po procesie wygrzewania zaformowano próbki cylindryczne Marshalla z wykorzystaniem ubijaka.

Próbki mastyksu grysowego SMA zostały wykonane z polimeroasfaltem PmB 45/80-55.

W celu oceny zmian właściwości mastyksu grysowego SMA pod wpływem wysokiej temperatury technologicznej 200, 250 i 300°C wykonano badania odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu oraz badania trwałości zmęczeniowej próbek SMA nie wygrzewanych oraz poddanych wygrzewaniu. Dodatkowo oceniono zmianę, pod wpływem wysokiej temperatury technologicznej, zawartości wolnej przestrzeni w próbkach przygotowanych do badania odporności na działanie wody i mrozu.

Szczegółowy program badań SMA do warstw nawierzchni mostowych przedstawiono poniżej:

- ocena zmian zawartości wolnej przestrzeni w próbkach do badania wskaźnika ITSR w funkcji temperatury wygrzewania wg PN-EN 12697-8 [N18],
- pomiar odporności na działanie wody i mrozu w temperaturze 25°C (wskaźnik ITSR) wg PN-EN 12697-12 [N25] i PN-EN 12697-23 [N26],
- pomiar odporności na zmęczenie w temperaturze 10°C, metoda belki 4-o punktowo zginanej wg PN-EN 12697-24 [N27] i PN-EN 12697-26 [N15] – opis metodyki przedstawiono w punkcie 4.5.

Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie ITS obliczono wg PN-EN 12697-23 zgodnie z wzorem:

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \quad (11)$$

gdzie:

ITS – wytrzymałość na rozciąganie pośrednie próbki, [GPa],
 P – szczytowa wartość obciążenia, [kN],
 D – średnica próbki, [mm],
 H – wysokość próbki, [mm].

Wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITSR obliczono według wzoru:

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (12)$$

gdzie:

ITSR – wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITSR, [%],
 ITS_w – średnia wytrzymałość na rozciąganie pośrednie oznaczona dla grupy próbek mokrych, [kPa],
 ITS_d – średnia wytrzymałość na rozciąganie pośrednie oznaczona dla grupy próbek suchych, [kPa].

Aparaturę do badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie mieszanek mineralno-asfaltowych przedstawiono na rys. 4-68 i 4-69 .



Rys. 4-68. Prasa Marshalla z przystawką do badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie



Rys. 4-69. Sposób ustawienia próbki Marshalla w szczękach do badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie

Wyniki badań mastyksu grysowego SMA

Wyniki badań właściwości mastyksu grysowego SMA 8 do nawierzchni mostowych, niewygrzewanego (oryginalnego) oraz wygrzewanego w temperaturze 200, 250 i 300°C przedstawiono w tabl. 4-58 i 4-59 i na rys. 4-70 i 4-71.

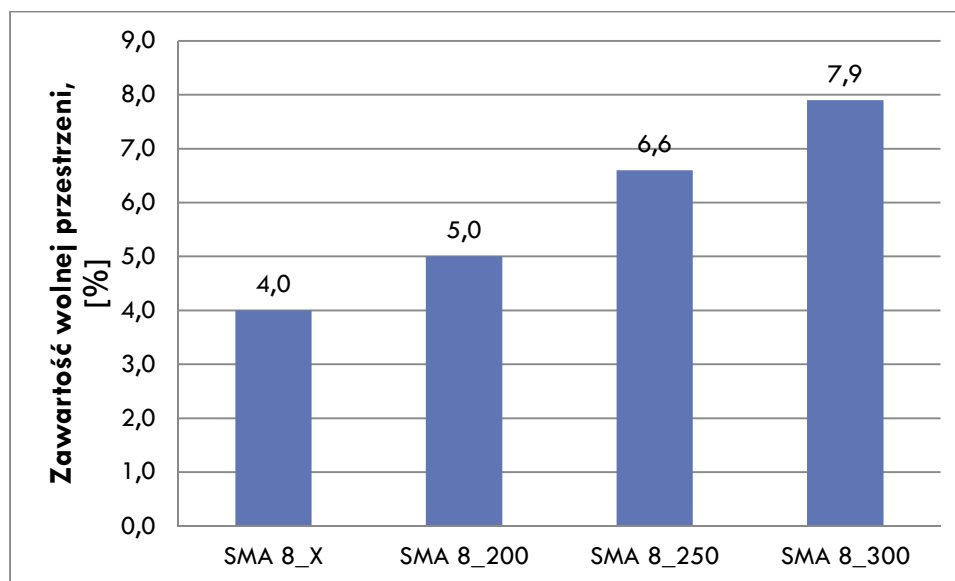
Zawartość wolnej przestrzeni w próbkach SMA w funkcji temperatury wygrzewania

W tabl. 4-58 i na rys. 4-70 przedstawiono wyniki badania zawartości wolnej przestrzeni w próbkach mastyksu grysowego SMA 8 przeznaczonych do oznaczenia wskaźnika ITSR w funkcji temperatury wygrzewania 200, 250 i 300°C.

Tablica 4-58. Wyniki badań zawartości wolnej przestrzeni SMA 8 w funkcji temperatury wygrzewania

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Gęstość objętościowa mma [kg/m³]	Gęstość mma [kg/m³]	Zawartość wolnej przestrzeni w próbkach mma* [%]
PmB 45/80-55	SMA8_X	-	2469	2571	4,0
	SMA8_200	200	2442	2571	5,0
	SMA8_250	250	2401	2571	6,6
	SMA8_300	300	2369	2571	7,9

* próbki zagęszczane po 35 uderzeń ubijaka na każdą stronę



Rys. 4-70. Zawartość wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach mastyksu grysowego SMA 8 z polimeroasfalcem PmB 45/80-55 w funkcji temperatury wygrzewania

Wg PN-EN 12697-12 [N25] próbki do badania odporności na działanie wody i mrozu ITSR zagęszcza się po 35 uderzeń ubijaka Marshalla na każdą stronę próbki. Podczas projektowania składu SMA próbki zagęszcza się z energią 50 uderzeń ubijaka na każdą stronę próbki. Dlatego też zawartość wolnej przestrzeni w próbce porównawczej (nie wygrzewanej) wynosząca 4,0%, różni się od zawartości wolnej przestrzeni w próbkach mastyksu grysowego obliczonej na etapie projektowania składu SMA (około 2,6%).

Na podstawie analizy wyników badania zawartości wolnej przestrzeni w próbkach mastyksu grysowego SMA 8 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 przeznaczonych do badania wskaźnika ITSR, (tabl. 4-58 i rys. 4-70) można stwierdzić, że wysoka temperatura wygrzewania 200-300°C wpływa na zmianę zawartości wolnej przestrzeni w próbce. Wzrost zawartości wolnej przestrzeni jest zależny od temperatury wygrzewania i jest on związany z pogorszeniem zagęszczalności mieszanki SMA. Trudno jest ocenić zmianę zawartości wolnej przestrzeni w odniesieniu do zmian właściwości lepiszcza. Zmiany te mogą być spowodowane dwoma czynnikami, tj. usztywnieniem lepiszcza związanym z zanikaniem sieci polimerowej w temperaturze powyżej 200°C oraz przejściem części żywicy w asfalteny. W przypadku mastyksu grysowego SMA, gdzie grys stanowi szkielet nośny mieszanki a mastyks jest tylko wypełnieniem wolnych przestrzeni, można przypuszczać, że wpływ asfaltu na właściwości SMA jest znacznie ograniczony.

Odporność na działanie wody i mrozu próbek SMA w funkcji temperatury wygrzewania

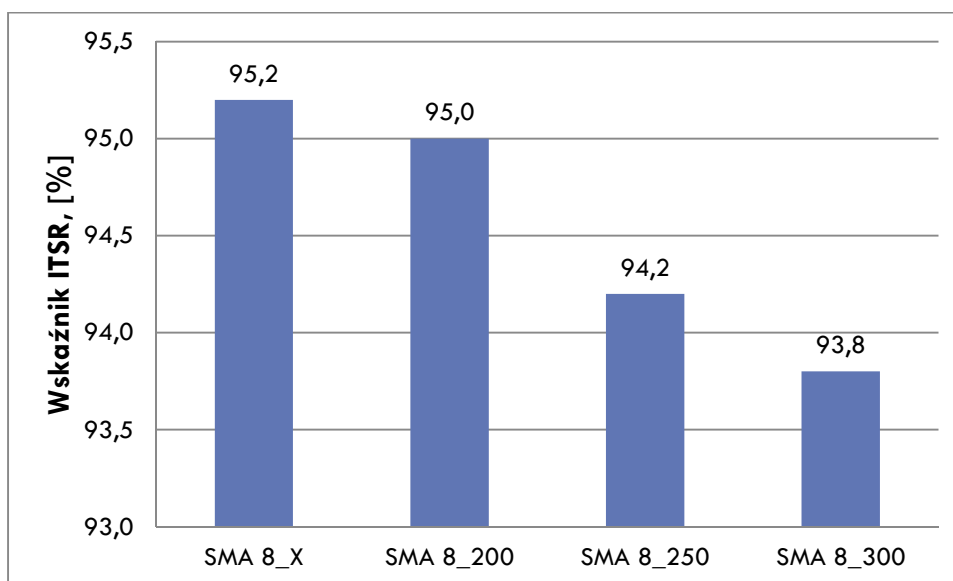
W tabl. 4-59 i na rys. 4-71 przedstawiono wyniki badania wskaźnika ITSR odporności na działanie wody i mrozu mastyksu grysowego SMA 8 w funkcji temperatury wygrzewania 200, 250 i 300°C. Wskaźnik ITSR obliczono na podstawie badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek poddanych kondycjonowaniu w wodzie ITS_w oraz próbek suchych ITS_d .

Tablica 4-59. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie pośrednie SMA 8 w funkcji temperatury wygrzewania

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	ITS_w [MPa]	ITS_d [MPa]	Wskaźnik ITSR* [%]
PmB 45/80-55	SMA8_X	-	8,94	9,40	95,2
	SMA8_200	200	8,98	9,45	95,0
	SMA8_250	250	10,06	10,68	94,2
	SMA8_300	300	10,42	11,11	93,8

* próbki zagęszczane po 35 uderzeń ubijaka na każdą stronę

Na podstawie analizy wyników wytrzymałości w rozciąganiu pośrednim ITS przedstawionych w tabl. 4-59 należy zwrócić uwagę, że wzrastającym wartościom wolnych przestrzeni próbek po wygrzewaniu, odpowiada zwiększenie wartości ITS, zarówno dla zestawu mokrego, jak i suchego. Jest to szczególnie widoczne w przypadku próbek wygrzewanych w temperaturze 250 i 300°C. Można sądzić, że tak, jak to stwierdzono przy badaniu wygrzewanego polimeroasfaltu, temperatura 250°C jest temperaturą graniczną, w której następują intensywne zmiany struktury i składu lepiszcza.



Rys. 4-71. Wskaźnik ITSR mastyksu grysowego SMA 8 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 w funkcji temperatury wygrzewania

Miarodajną oceną odporności zagęszczonej mieszanki mineralno-asfaltowej na działanie wody z jednym cyklem zamrażania, jest badanie odporności na działanie wody wg PN-EN 12697-12 [N25]. Na podstawie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie zestawu „mokrego” próbek i zestawu „suchego” obliczono wskaźnik ITSR.

Na podstawie analizy wyników badania wskaźnika ITSR mastyksu grysowego SMA 8 stosowanego do warstw nawierzchni na obiekcie inżynierskim, przedstawionych w tabl. 4-59 oraz na rys. 4-71 można stwierdzić, że:

- wszystkie mieszanki SMA 8 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55, tj. wyjściowa oraz po wygrzaniu w temperaturze 200, 250 i 300°C mają wysokie wartości wskaźników, powyżej 90% i spełniają wymagania WT-2: 2010;
- temperatura wygrzewania 200 do 300°C wpływa nieznacznie na obniżenie wskaźnika ITSR;
- wysoka zawartość wolnej przestrzeni w próbkach SMA 8 mieszanki wyjściowej, jak również mieszanek wygrzewanych, nie powodują w sposób zasadniczy pogorszenia wskaźników ITSR.

Można stwierdzić, że mieszanka mastyksu grysowego SMA 8 charakteryzuje się dobrymi właściwościami a wpływ temperatury na zmianę tych parametrów jest niewielki.

Oceniając wpływy wysokich temperatur technologicznych na zmianę właściwości mastyksu grysowego SMA 8 należy mieć na uwadze wzajemne oddziaływanie mieszanki mineralnej, tworzącej szkielet nośny i lepiszcza zawartego w mastyksie grysowym. Ze względu na wysoki udział frakcji grysowej wpływ lepiszcza jest ograniczony a odkształcalność SMA jest zdecydowanie mniejsza niż w stosowanych do warstwy izolacji i warstwy ochronnej asfaltów lanych MA.

Odporność na zmęczenie próbek SMA w funkcji temperatury wygrzewania

Wyniki badania odporności na zmęczenie mastyksu grysowego SMA 8, betonu asfaltowego AC 11 oraz mastyksu wysokogrysowego SMA/MA 8 w funkcji temperatury wygrzewania 250°C przedstawiono tabl. 4-69 i na rys. 4-87, 4-88 i 4-89 (punkt. 4.5.2.).

4.4.3 Warstwa ochronna/warstwa ścieralna z betonu asfaltowego (AC)

Zaprojektowano mieszankę mineralno-asfaltową typu beton asfaltowy (AC) o uziarnieniu 11 mm (AC 11) kategorii ruchu KR5-KR6 zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1]. Projektując mieszankę mineralną typu AC, kierowano się zasadą uzyskania jak największej szczelności mieszanki, przy jednoczesnym zachowaniu zawartości frakcji grysowej powyżej 55%.

Wymagania odnośnie mastyksu grysowego AC

Wymagania dotyczące mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy AC określa norma PN-EN 13108-1 [N28] oraz WT-2: 2010 [N1], gdzie podane są podstawowe klasyfikacyjne wymagania.

W tabl. 4-60 , 4-61 i 4-62 przedstawiono wymagania odnośnie projektowania i właściwości betonu asfaltowego do warstwy ścieralnej, kategorii ruchu KR3 do KR6.

Tablica 4-60. Uziarnienie mieszanki mineralnej oraz zawartość lepiszcza do betonu asfaltowego AC do warstwy ścieralnej, kategorii ruchu KR 3-6 wg WT-2: 2010

Właściwość	Przesiew, [% (m/m)]			
	AC 8 S KR3÷6		AC 11 S KR3÷6	
Wymiar sita #, [mm]	od	do	od	do
16	-	-	100	-
11,2	100	-	90	100
8	90	100	60	90
5,6	60	80	-	-
2	40	55	35	50
0,125	8	22	8	20
0,063	5,0	12,0	5,0	11,0
Zawartość lepiszcza	$B_{\min 5,6}$		$B_{\min 5,4}$	

Tabela 4-61. Wymagane właściwości betonu asfaltowego AC do kategorii ruchu KR 3-4 wg WT-2: 2010

Właściwość	Warunki zagęszczania wg PN-EN 13108-20	Metoda i warunki badania	Wymiar mieszanki	
			AC 8 S	AC 11 S
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.3, ubijanie, 2 × 75 uderzeń	PN-EN 12697-8, p. 4	$V_{\min 2,0}$ $V_{\max 4.0}$	$V_{\min 2,0}$ $V_{\max 4.0}$
Odporność na deformacje trwałe ^{a)}	C.1.20, wałowanie, $P_{98}-P_{100}$,	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 60°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR 0,50}$ PRD_{AIR} Deklarowane	$WTS_{AIR 0,50}$ PRD_{AIR} Deklarowane
Odporność na działanie wody	C.1.1, ubijanie, 2 × 35 uderzeń	PN-EN 12697-12, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania ^{b)} , badanie w 25°C	$ITSR_{90}$	$ITSR_{90}$
^{a)} Grubość płyty: AC8 40 mm, AC11 40 mm				
^{b)} Ujednoliconą procedurę badania odporności na działanie wody z jednym cyklem zamrażania podano w załączniku 1				

Tabela 4-62. Wymagane właściwości betonu asfaltowego AC do kategorii ruchu KR 5-6 wg WT-2: 2010

Właściwość	Warunki zagęszczania wg PN-EN 13108-20	Metoda i warunki badania	Wymiar mieszanki	
			AC 8 S	AC 11 S
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.3, ubijanie, 2 × 75 uderzeń	PN-EN 12697-8, p. 4	$V_{\min 2,0}$ $V_{\max 4.0}$	$V_{\min 2,0}$ $V_{\max 4.0}$
Odporność na deformacje trwałe ^{a)}	C.1.20, wałowanie, $P_{98}-P_{100}$,	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 60°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR 0,30}$ PRD_{AIR} Deklarowane	$WTS_{AIR 0,30}$ PRD_{AIR} Deklarowane
Odporność na działanie wody	C.1.1, ubijanie, 2 × 35 uderzeń	PN-EN 12697-12, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania ^{b)} , badanie w 25°C	$ITSR_{90}$	$ITSR_{90}$
^{a)} Grubość płyty: AC8 40 mm, AC11 40 mm				
^{b)} Ujednoliconą procedurę badania odporności na działanie wody z jednym cyklem zamrażania podano w załączniku 1				

Materiały

Do mieszanek mineralno-asfaltowych typu mastyks grysowy zastosowano następujące materiały:

- wypełniacz dodany - mączka wapienna Wolica,
- piasek łamany frakcji 0/0,063 mm, z otoczków Paczków,
- grys frakcji 2/5 mm, gabra Słupiec,
- grys frakcji 5/8 mm, gabra Słupiec,
- grys frakcji 8/11 mm, gabra Słupiec
- lepiszcza:
 - PmB 45/80-55 (do warstwy ścieralnej),
 - PmB 25/55-60 (do warstwy ochronnej).

Badania materiałów kamiennych – uziarnienie

W celu ustalenia optymalnego składu mieszanki mineralnej wykonano oznaczenie składu ziarnowego materiałów kamiennych zgodnie z normą PN-EN 933-1 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania” [N10]. Poszczególne kruszywa przesiewano przez normowy zestaw sit (zestaw podstawowy +1), metodą „na sucho”. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego poszczególnych kruszyw przedstawiono w tabl. 4-63.

Tablica 4-63. Skład ziarnowy materiałów kamiennych do betonu asfaltowego AC

Wymiar boku kwadratowego oczka sita [mm]	Zawartość ziaren pozostających na sicie [%]				
	Mączka wapienna Wolica	Piasek łamany z otoczków Paczków 0,063/2	Grys gablo Słupiec 2/5	Grys gablo Słupiec 5/8	Grys gablo Słupiec 8/11
45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,2	0,0	0,0	0,0	0,6	6,3
8,0	0,0	0,0	0,0	8,9	72,5
5,6	0,0	0,0	5,5	65,3	15,6
4,0	0,0	0,0	42,5	20,0	4,9
2,0	0,0	5,9	45,6	3,4	0,3
1,0	0,0	26,9	4,4	0,9	0,0
0,5	0,0	32,7	0,9	0,1	0,0
0,25	0,2	21,0	0,2	0,1	0,1
0,125	2,7	8,6	0,2	0,2	0,1
0,063	18,6	2,9	0,7	0,5	0,2
< 0,063	78,7	2,0	0,0	0,0	0,0
□	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Uziarnienie wypełniacza mieści się w granicach wymagań od 70 – 100% ziaren przechodzących przez sito 0,063 mm. Piaski oraz grysy mają uziarnienia w granicach nie przekraczających wymagań wg WT-1:2010 dotyczących mieszanek AC.

Badania materiałów kamiennych – gęstość

Oznaczenie gęstości materiałów kamiennych zostało wykonane metodą piknometryczną wg PN-EN 1097-6 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości” [N12] i PN-EN 1097-7 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna” [N13]. Metoda polega na obliczeniu ilorazu masy ziaren i ich objętości, określonej za pomocą piknometru. Wyniki oznaczenia przedstawia tabl. 4-64.

Tablica 4-64. Gęstości kruszyw i wypełniacza

Rodzaj kruszywa	Gęstość, [g/cm ³]
Grys gabro Słupiec 8/11	2,949
Grys gabro Słupiec 5/8	2,972
Grys gabro Słupiec 2/5	2,994
Piasek łamany z otoczków Paczków	2,703
Mączka wapienna Wolica	2,700

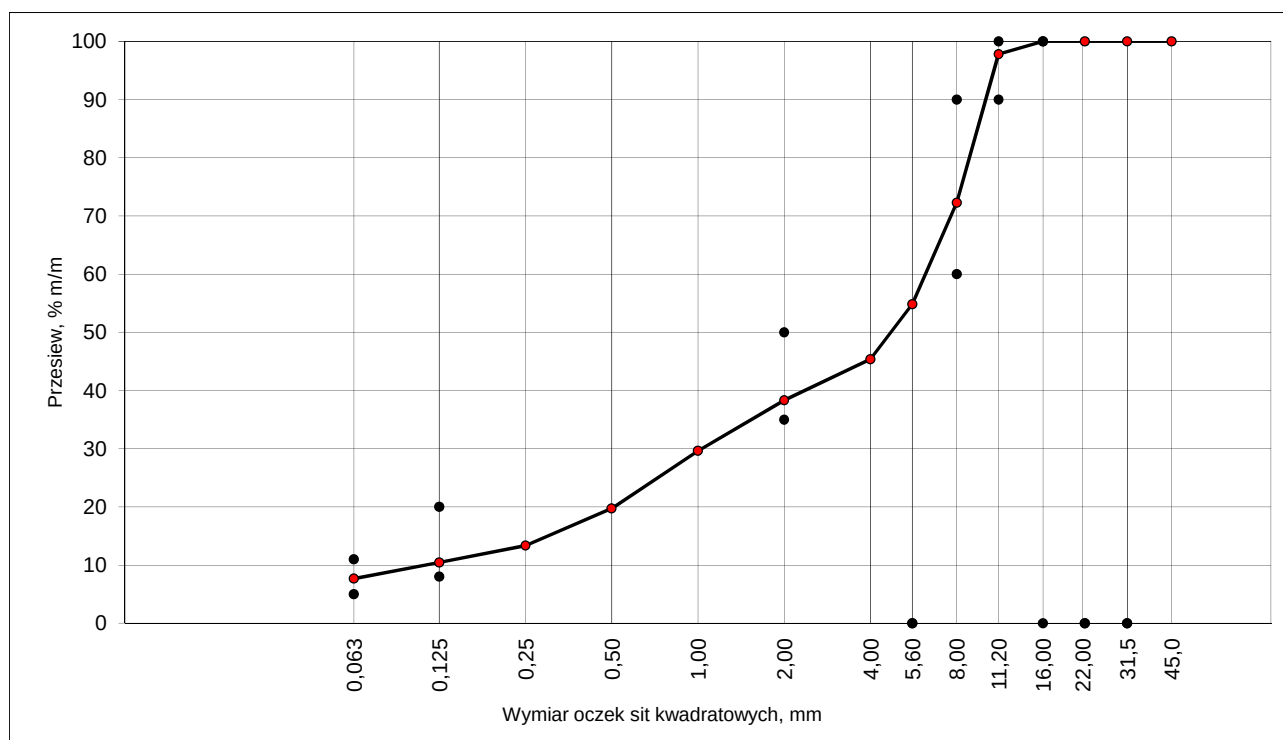
Gęstość kruszyw wykorzystano do ustalania współczynnika korygującego zawartość lepiszcza wg WT-2: 2010 [N1].

Ustalenie składu mieszanki mineralno-asfaltowej typu AC

Projekt mieszanki mineralnej

Mieszankę mineralno-asfaltową typu beton asfaltowy AC zaprojektowano wykorzystując wymagania zgodne z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1]. Zaprojektowano jeden rodzaj mieszanki mineralno-asfaltowej typu AC 11, dla kategorii ruchu KR3 do KR6.

Krzywą uziarnienia zaprojektowanej mieszanki mineralnej do betonu asfaltowego AC 11 przedstawiono na rys. 4-72.



Rys. 4-72 . Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej do betonu asfaltowego AC 11

Ustalenie zawartości wolnej przestrzeni w mieszance typu AC

W celu zaprojektowania optymalnego składu AC, przeprowadzono badania gęstości mieszanki mineralno-asfaltowej AC wg PN-EN 12697-5 [N16] i gęstości objętościowej zagęszczonej mieszanki AC wg PN-EN 12697-6 [N17]. Próbkę AC zagęszczano po 75 uderzeń ubijaka Marshalla na każdą stronę próbki. Na podstawie uzyskanych wyników badań obliczono zawartość wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach zgodnie z PN-EN 12697-8 [N18]. Wyniki badań gęstości i gęstości objętościowej mieszanki mineralno-asfaltowej oraz obliczone zawartości wolnej przestrzeni AC 11 przedstawiono w tabl. 4-65.

Tablica 4-65. Gęstość oraz zawartość wolnych przestrzeni mieszanki AC 11

Oznaczenie próbki	Zawartość asfaltu w próbkach	Gęstość objętościowa mma	Gęstość mma	Zawartość wolnej przestrzeni w próbkach mma*
	[%]	[kg/m³]	[kg/m³]	[%]
AC11_nr 1	5,4	2553	2603	1,9
AC11_nr 2		2553	2603	1,9
AC11_nr 3		2540	2603	2,4
Średnia:				2,1
AC11_nr 1	5,9	2562	2582	0,8
AC11_nr 2		2555	2582	1,1
AC11_nr 3		2549	2582	1,3
Średnia:				1,1
AC11_nr 1	6,4	2545	2561	0,6
AC11_nr 2		2553	2561	0,3
AC11_nr 3		2543	2561	0,7
Średnia:				0,5

* próbki zagęszczane po 75 uderzeń ubijaka na każdą stronę

Na podstawie uzyskanych wyników badań zawartości wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach AC 11 stwierdzono, że zaprojektowany skład mieszanki mineralnej, przy zawartości lepiszcza 5,4% (m/m), pozwalają na uzyskanie optymalnej zawartości wolnej przestrzeni, na poziomie około 2,1% (m/m), co powinno zapewnić dużą szczelność warstwy ochronnej i ścieralnej nawierzchni mostowej.

Ostateczny skład mieszanek mineralno-asfaltowych

Ostateczny skład mieszanek mineralno-asfaltowych typu AC 11 przedstawiono w tabl. 4-66.

Tablica 4-66. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej (mma) typu AC 11

Składniki mma	Skład mma [%]
Lepiszczce	5,4
Mączka wapienna Wolica	8,5
Piasek łamany z otoczków Paczków	28,4
Grys gablo Słupiec 2/5	9,5
Grys gablo Słupiec 5/8	17,0
Grys gablo Słupiec 8/11	31,2
	100,0

Idea projektowania nawierzchni odpornych na deformacje trwałe polega na założeniu, że szkielet grysowy klinujących się ziaren, zapewni taką odporność warstw o grubości około 2,5 cm do 4,0 cm, nawet przy zwiększonej zawartości lepiszcza. W zaprojektowanym składzie AC 11, łączna zawartość frakcji grysowej wynosi 58% (m/m), co powinno zapewnić odporność nawierzchni na deformacje trwałe.

Program badań betonu asfaltowego

W celu określenia odporności na wysokie temperatury przy wytwarzaniu, transporcie i układaniu mieszanek mineralno-asfaltowych, luźną mieszankę betonu asfaltowego (AC) poddano wygrzewaniu w temperaturze: 200, 250 i 300°C w warstwie około 50 mm. Czas wygrzewania wynosił 1 godzinę. Po procesie wygrzewania zaformowano próbki cylindryczne Marshalla z wykorzystaniem ubijaka (rys. 4-73).

Próbki mastyksu grysowego zostały wykonane z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 (warstwa ścierna) oraz z polimeroasfaltem PmB 25/55-60 (warstwa ochronna).



Rys. 4-73. Próbki betonu asfaltowego AC 11 z polimeroasfaltem PmB 25/55-60 przed wygrzewaniem oraz po wygrzewaniu w temperaturze 200, 250 i 300°C przygotowane do badań

W celu oceny zmian właściwości betonu asfaltowego AC pod wpływem wysokiej temperatury technologicznej 200, 250 i 300°C wykonano badania odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na

działanie wody i mrozu oraz badania trwałości zmęczeniowej próbek AC nie wygrzewanych oraz poddanych wygrzewaniu. Dodatkowo, oceniono zmianę, pod wpływem wysokiej temperatury technologicznej, zawartości wolnej przestrzeni w próbkach przygotowanych do badania odporności na działanie wody i mrozu.

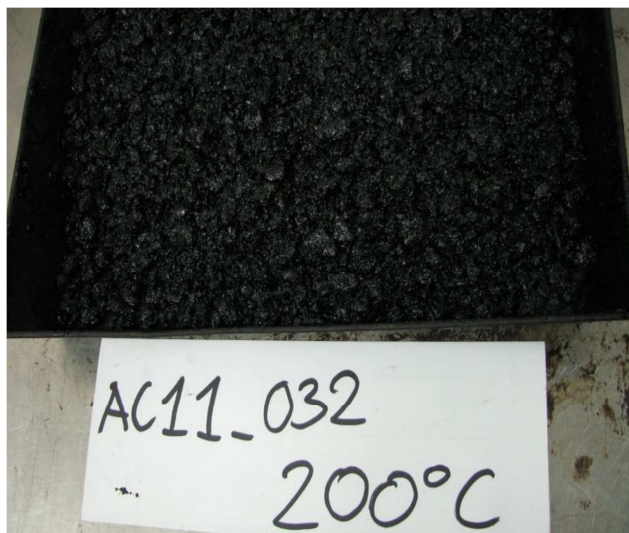
Szczegółowy program badań AC do warstw nawierzchni mostowych przedstawiono poniżej:

- ocena zmian zawartości wolnej przestrzeni w próbkach do badania wskaźnika ITSR w funkcji temperatury wygrzewania wg PN-EN 12697-8 [N18],
- pomiar odporności na działanie wody i mrozu w temperaturze 25°C (wskaźnik ITSR) wg PN-EN 12697-12 [N25] i PN-EN 12697-23 [N26],
- pomiar odporności na zmęczenie w temperaturze 10°C, metoda belki 4-o punktowo zginanej wg PN-EN 12697-24 [N27] i PN-EN 12697-26 [N15].

Metodykę badań opisano w punkcie 4.4.2. (wskaźnik ITSR) i 4.5. (trwałość zmęczeniowa).

Wyniki badań betonu asfaltowego AC

Zmiany wyglądu powierzchni próbek betonu asfaltowego AC po procesie wygrzewania pokazano na rys. 4-74 do 4-75.



Rys. 4-74. Beton asfaltowy z polimeroasfaltem PmB 25/55-60 wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 200°C



Rys. 4-75. Beton asfaltowy z polimeroasfaltem PmB 25/55-60 wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 300°C

Na podstawie oceny wizualnej zmiany powierzchni próbek betonu asfaltowego poddanych wygrzewaniu przez 1 godzinę, w temperaturze 200, 250 i 300°C, nie stwierdzono znaczących zmian w wyglądzie luźnej mieszanki mineralno-asfaltowej

Wyniki badań właściwości betonu asfaltowego AC 11 do nawierzchni mostowych, niewygrzewanego (oryginalnego) oraz wygrzewanego w temperaturze 200, 250 i 300°C przedstawiono w tabl. 4-67 i 4-68. i na rys. 4-76, 4-77 i 4-78.

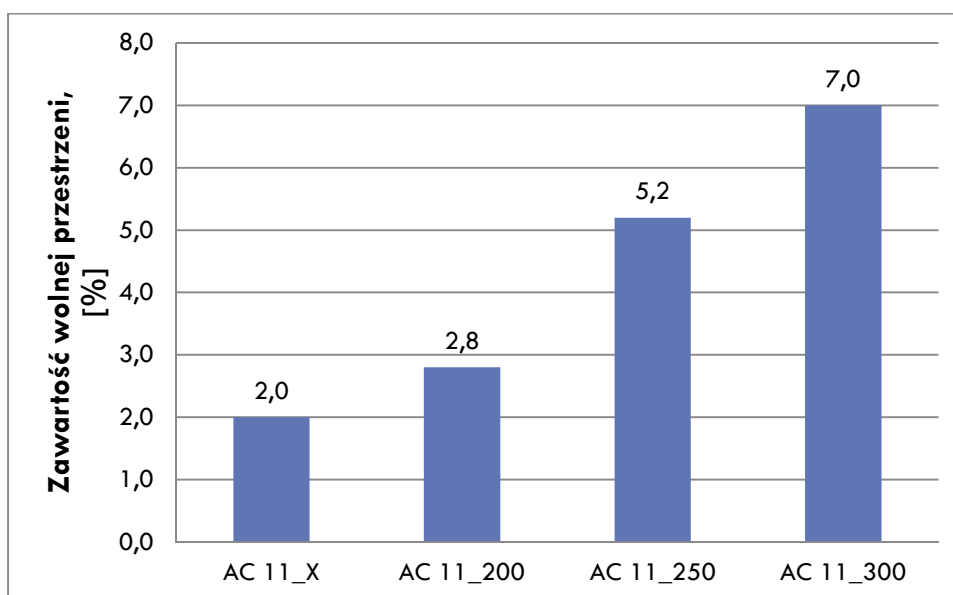
Zawartość wolnej przestrzeni w próbkach AC w funkcji temperatury wygrzewania

W tabl. 4-67 i na rys. 4-76 przedstawiono wyniki badania zawartości wolnej przestrzeni w próbkach betonu asfaltowego AC 11 przeznaczonych do oznaczenia wskaźnika ITSR w funkcji temperatury wygrzewania 200, 250 i 300°C.

Tablica 4-67. Wyniki badań zawartości wolnej przestrzeni AC 11 w funkcji temperatury wygrzewania

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Gęstość objętościowa mma [kg/m ³]	Gęstość mma [kg/m ³]	Zawartość wolnej przestrzeni w próbkach mma* [%]
PmB 45/80-55	AC11_X	-	2551	2603	2,0
	AC11_200	200	2530	2603	2,8
	AC11_250	250	2469	2603	5,2
	AC11_300	300	2421	2603	7,0

* próbki zagęszczane po 35 uderzeń ubijaka na każdą stronę



Rys. 4-76. Zawartość wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach betonu asfaltowego AC 11 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 w funkcji temperatury wygrzewania

Wg PN-EN 12697-12 [N25] próbki do badania odporności na działanie wody i mrozu ITSR zagęszcza się po 35 uderzeń ubijaka Marshalla na każdą stronę próbki. Podczas projektowania składu AC próbki zagęszcza się z energią 75 uderzeń ubijaka na każdą stronę próbki. Należy zwrócić uwagę, że zmniejszenie energii zagęszczania próbek z 75 do 35 uderzeń na każdą stronę próbki, nie zmieniło zawartości wolnych przestrzeni w betonie asfaltowym, która pozostała na poziomie około 2,0% (m/m).

Na podstawie analizy wyników badania zawartości wolnej przestrzeni w próbkach betonu asfaltowego AC 11 przeznaczonych do badania wskaźnika ITSR, (tabl. 4-67 i rys. 4-76) można stwierdzić, że mieszanka AC 11 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 po wygrzaniu w temperaturze 200°C wykazuje nieznaczny wzrost zawartości wolnej przestrzeni w porównaniu do mieszanki AC nie wygrzewanej. W temperaturze powyżej 200°C obserwuje się intensywne oddziaływanie wysokiej temperatury na właściwości lepiszcza. W wyniku utwardzenia lepiszcza intensywnie wzrasta zawartość

wolnej przestrzeni w próbkach. W temperaturze 250°C zawartość wolnej przestrzeni wynosi 5,0% a w temperaturze 300°C wynosi już 7,0%.

Odporność na działanie wody i mrozu próbek AC w funkcji temperatury wygrzewania

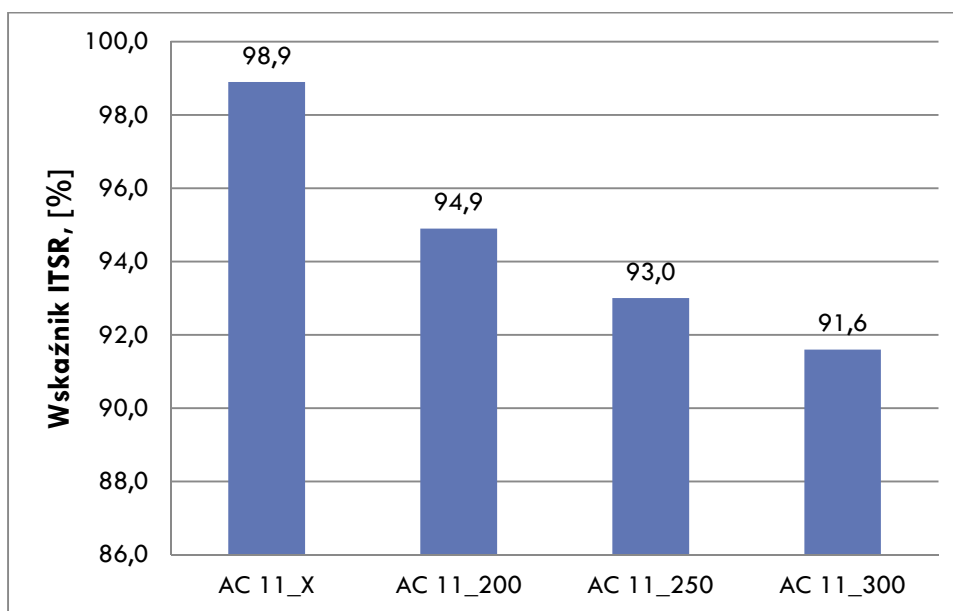
W tabl. 4-68 oraz na rys. 4-77 i 4-78 przedstawiono wyniki badania wskaźnika ITSR odporności na działanie wody i mrozu betonu asfaltowego AC 11 w funkcji temperatury wygrzewania 200, 250 i 300°C. Wskaźnik ITSR obliczono na podstawie badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek poddanych kondycjonowaniu w wodzie ITS_w oraz próbek suchych ITS_d .

Tablica 4-68. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie pośrednie AC 11 w funkcji temperatury wygrzewania

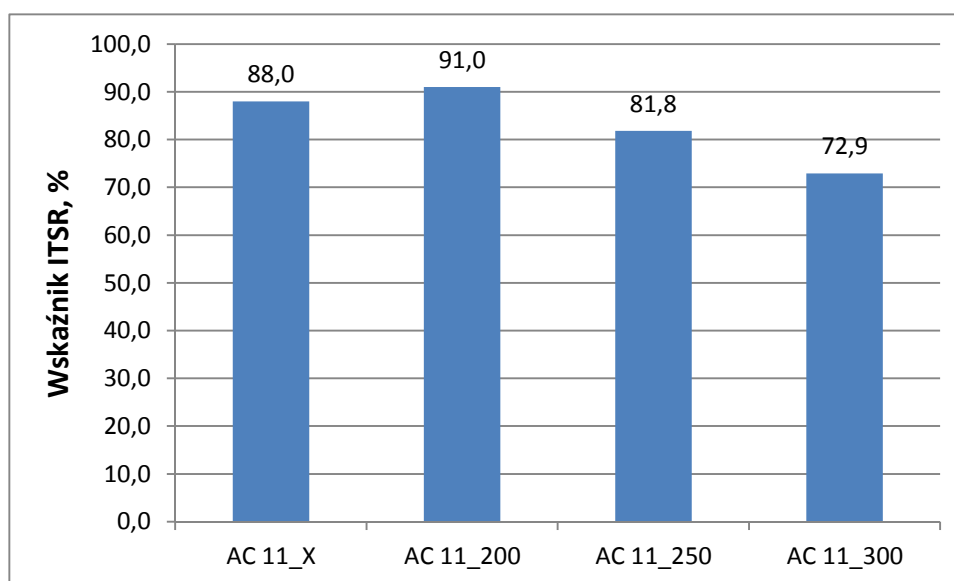
Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	ITS_w [MPa]	ITS_d [MPa]	Wskaźnik ITSR* [%]
PmB 45/80-55	AC11_X	-	1,03	1,04	98,9
	AC11_200	200	1,10	1,16	94,9
	AC11_250	250	1,23	1,32	93,0
	AC11_300	300	1,10	1,20	91,6
PmB 25/55-60	AC11_X	-	1,61	1,83	88,0
	AC11_200	200	1,84	2,02	91,0
	AC11_250	250	1,30	1,59	81,8
	AC11_300	300	0,96	1,31	72,9

* próbki zagęszczane po 35 uderzeń ubijaka na każdą stronę

Na podstawie analizy wyników badań wytrzymałości w rozciąganiu pośrednim ITS betonu asfaltowego AC 11 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 obserwuje się w temperaturze do 250°C wzrost wartości ITS, zarówno zestawu „mokrego”, jak i „suchego” próbek. Podobnie jak przy badaniu właściwości wygrzewanych polimeroasfaltów, można przyjąć, że temperatura 250°C jest temperaturą graniczną, poniżej której polimeroasfalt zachowuje swoje właściwości lepkosprężyste. Obniżone wartości ITS po wygrzewaniu w 300°C wskazują, że w temperaturze powyżej 250°C następuje zniszczenie przestrzennej struktury polimeru, lepiszcze staje się plastyczne a mieszanka mineralno-asfaltowa charakteryzuje się obniżonymi wartościami ITS. Podobne zjawisko można zaobserwować w przypadku betonu asfaltowego AC 11 z polimeroasfaltem PmB 25/55-60, z tym że obniżenie wartości ITS można już stwierdzić w temperaturze 250°C.



Rys. 4-77. Wskaźnik ITSR betonu asfaltowego AC 11 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 w funkcji temperatury wygrzewania



Rys. 4-78. Wskaźnik ITSR betonu asfaltowego AC 11 z polimeroasfaltem PmB 25/55-60 w funkcji temperatury wygrzewania

Na podstawie analizy wyników badania wskaźnika ITSR betonu asfaltowego AC 11 stosowanego do warstw nawierzchni na obiekcie inżynierskim przedstawionych w tabl. 4-68 i na rys. 4-77 można stwierdzić, że wszystkie wartości wskaźników ITSR próbek AC wyjściowych i wygrzewanych do 300°C są korzystne i wynoszą powyżej 90%. Mieszanki AC 11 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 po wygrzaniu w temperaturze 200°C wykazują obniżenie ITSR o 5% a dalsze wygrzewanie w temperaturze 250 i 300°C powoduje dalsze znaczne obniżenie wskaźnika ITSR o wartość około 10% w temperaturze 300°C.

Analizując wyniki badań wskaźnika ITSR betonu asfaltowego z polimeroasfaltem PmB 25/55-60 (rys. 4-78) można zauważyć wzrost wskaźnika w wyniku wygrzewania w temperaturze 200°C, co może być związane z korzystnym usieciowaniem polimeru w lepiszczu. Wyższe temperatury wygrzewania mieszanki powodują obniżenie odporności AC 11 na działanie wody i mrozu, co jest spowodowane degradacją struktury sieci polimerowej w lepiszczu.

Porównując wartości ITS oraz wskaźnika ITSR obliczone dla mastyksu grysowego SMA 8 oraz betonu asfaltowego AC 11, można zauważyć że na właściwości betonu asfaltowego w większym stopniu wpływa lepiszcze niż szkielet mineralny. Inny charakter zmian ITS i ITSR obserwuje się w przypadku mastyksu grysowego SMA 8, gdzie nośny szkielet grysowy wpływa w decydujący sposób na właściwości wytrzymałościowe.

Porównanie wyników badań SMA i betonu asfaltowego AC, pozwalają przypuszczać, że mieszanka typu SMA jest bardziej odporna na niszczące oddziaływanie wysokich temperatur technologicznych.

Odporność na zmęczenie próbek AC w funkcji temperatury wygrzewania

Wyniki badania odporności na zmęczenie betonu asfaltowego AC 11 w funkcji temperatury wygrzewania 250°C przedstawiono w tabl. 4-69 i na rys. 4-85, 4-88 i 4-89 (punkt. 4.5.2.).

4.5 Porównanie badań zmęczeniowych - modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych z betonu asfaltowego (AC), mastyksu grysowego (SMA) i mastyksu wysokogrysowego (SMA/MA)

4.5.1 Trwałość zmęczeniowa – metodyka badawcza

Badania laboratoryjne nad trwałością zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych wykonano przy użyciu aparatu UTM-25. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 4-79.



Rys. 4-79 Uniwersalne urządzenie UTM-25, do badań zmęczeniowych mieszanek mineralno-asfaltowych

Badanie próbek z mieszanek mineralno-asfaltowych wykonano zgodnie z normą: PN-EN 12697-26 „Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – „Badanie 4-punktowego zginania 4PB-PR”.

Próbki belkowe do badań zmęczeniowych były wycinane z płyt zagęszczanych w warunkach laboratoryjnych metodą wałowania. Zagęszczone płyty miały wymiar 300x400x100mm. Wycinanie próbek z płyty odbywało się po 24h od ich wykonania (rys. 4-80 i 4-81).

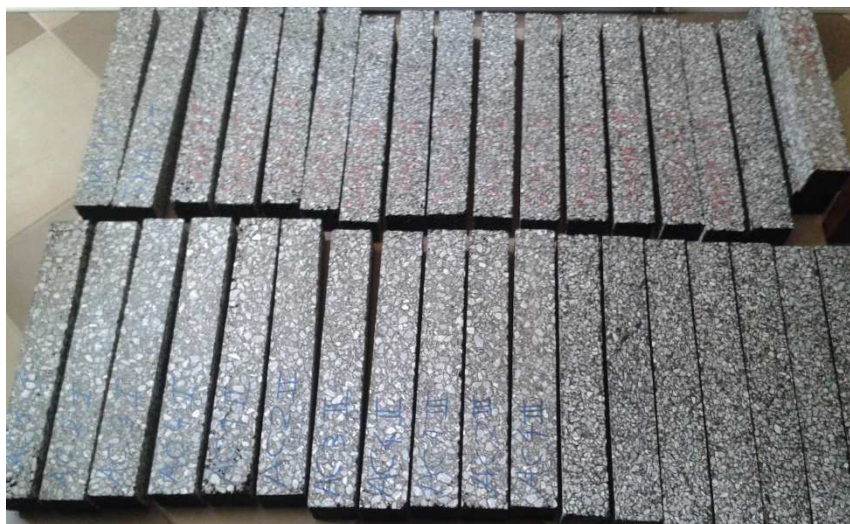


Rys. 4-80 Widok wycinania próbek z zagęszczonych płyt z mieszanki mineralno-asfaltowej



Rys. 4-81 Widok wyciętej próbki z zagęszczonej płyty z mieszanki mineralno-asfaltowej

Po wycięciu, próbki belkowe sezonowano przez okres 16 dni na równej powierzchni, w temperaturze 20°C (rys. 4-82).



Rys. 4-82 Widok próbek belkowych do badań zmęczeniowych

Próbki (oczekujące na badanie), po okresie 21 dni od chwili wycięcia, przechowywano w chłodziarce w temperaturze 5°C . Przed oznaczaniem, próbki sezonowano w temperaturze badania (10°C) przez 4 godziny.

Próbki belkowe poddawano cztero-punktowemu cyklicznemu zginaniu z zachowaniem swobodnego obrotu i poziomym przesunięciem we wszystkich punktach obciążenia i reakcji (podpory rolkowe) (rys. 4-83).



Rys. 4-83 Widok próbki belkowej umieszczonej w aparacie pomiarowym

Badania laboratoryjne były przeprowadzone przy zachowaniu następujących warunków:

Moduł sztywności E

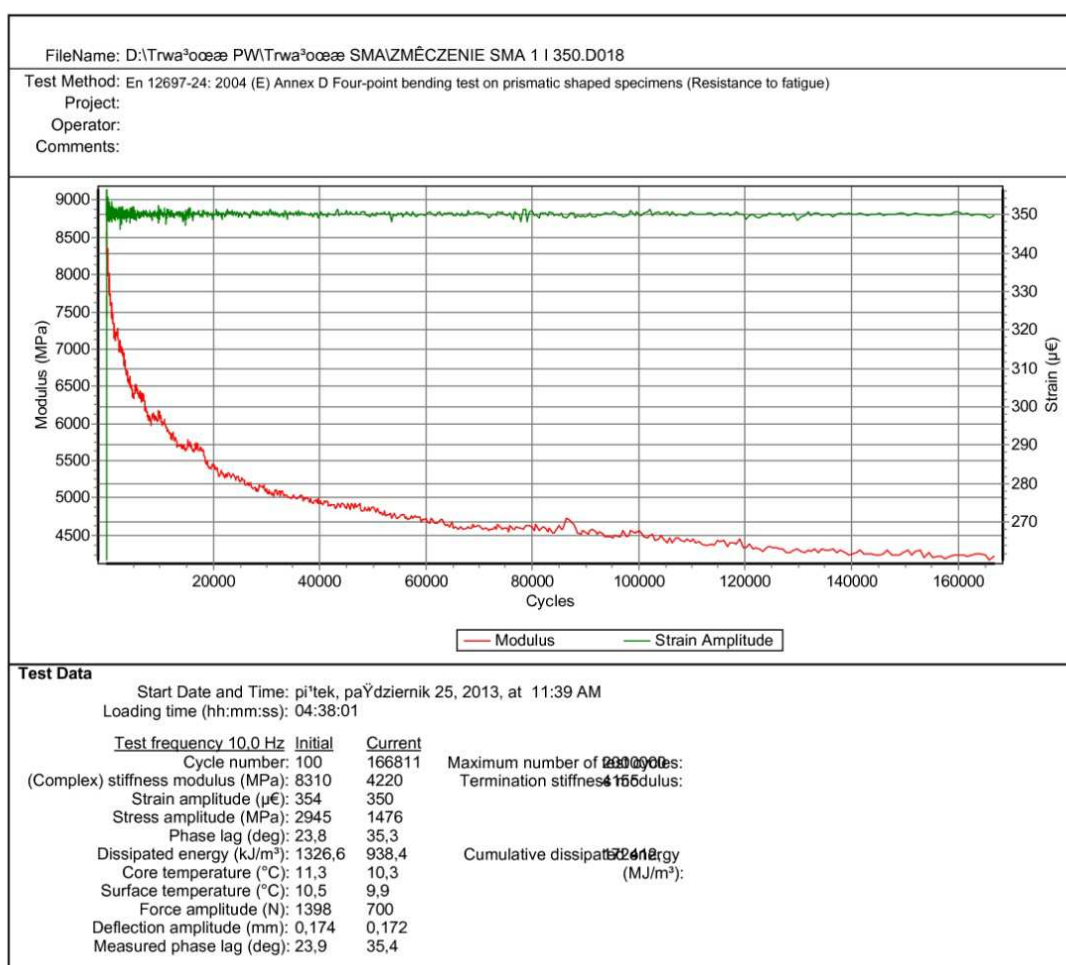
- temperatura badania $+10^{\circ}\text{C}$,
- czteropunktowe cykliczne zginanie belki przy stałej amplitudzie odkształcenia zmieniającej się według funkcji sinusoidalnej,
- amplituda odkształcenia $\varepsilon = 50 \mu\text{m}/\text{m}$, częstotliwość 10Hz ,
- moduł sztywności wyznaczano dla 100-go cyklu obciążenia.

Trwałość zmęczeniowa N_f

- temperatura badania $+10^{\circ}\text{C}$,
- czteropunktowe cykliczne zginanie belki przy stałej amplitudzie odkształcenia zmieniającej się według funkcji sinusoidalnej,
- częstotliwość obciążenia 10Hz,
- wartości amplitudy odkształcenia: w badaniu mieszanek AC: $170\text{ }\mu\text{m/m}$, $200\text{ }\mu\text{m/m}$, $250\text{ }\mu\text{m/m}$ i $300\text{ }\mu\text{m/m}$, mieszanek AC_250 (po wygrzewaniu w temperaturze 250°C): $200\text{ }\mu\text{m/m}$, $225\text{ }\mu\text{m/m}$ i $250\text{ }\mu\text{m/m}$, mieszanek SMA i SMA_250: $250\text{ }\mu\text{m/m}$, $300\text{ }\mu\text{m/m}$, $350\text{ }\mu\text{m/m}$ i $400\text{ }\mu\text{m/m}$, mieszanek SMA/MA i SMA/MA_250: $250\text{ }\mu\text{m/m}$, $300\text{ }\mu\text{m/m}$, $350\text{ }\mu\text{m/m}$, $400\text{ }\mu\text{m/m}$ i $450\text{ }\mu\text{m/m}$.

Próbkę uważano za zniszczoną zmęczeniowo w tym momencie obciążenia, w którym moduł sztywności osiągał wartość równą połowie wartości początkowego modułu określonego w setnym cyklu obciążenia. Badaniom poddano od 3 do 6 próbek równoległych na każdym poziomie odkształcenia.

Na rys. 4-84 przedstawiono przykładowy zapis wyników badania trwałości zmęczeniowej mieszanki SMA.



Rys. 4-84 Przykładowy zapis wyników badania trwałości zmęczeniowej

4.5.2 Wyniki badań trwałości zmęczeniowej

Przeprowadzono badania trwałości zmęczeniowej metodą belki 4-o punktowo zginanej wg PN-EN 12696-24 [N27] i PN-EN 12697-26 [N15] betonu asfaltowego AC 11, mastyksu grysowego SMA 8 i mastyksu wysokogrysowego SMA/MA 8, z uwzględnieniem wpływu wysokiej temperatury technologicznej 250°C.

Zestawienie wyników badań modułów sztywności oraz obliczone indeksy zmiany modułu sztywności I_E mieszanek mineralno-asfaltowych AC 11, SMA 8 i SMA/MA 8 przedstawiono w tabl. 4-69.

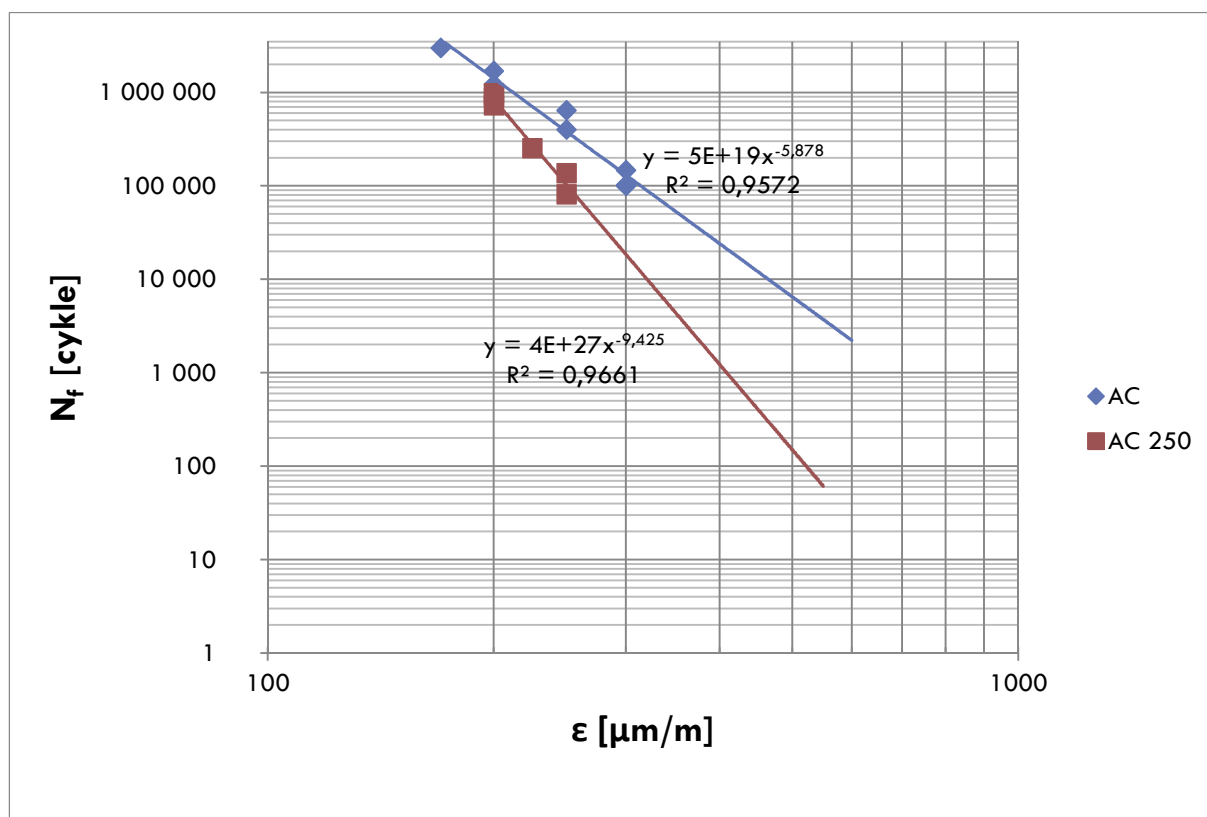
Tablica 4-69. Wyniki badań modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych

Rodzaj MMA:	Beton asfaltowy AC 11		I_E	Mastyks grysowy SMA 8		I_E	Mastyks wysokogrysowy SMA/MA 8		I_E
Nr próbki	AC	AC_250		SMA	SMA_250		SMA/MA	SMA/MA_250	
1	8916	13895		9414	10641		6424	7802	
2	10078	17112		9731	10257		6508	8100	
3	10973	14211		10095	10824		9673	7319	
4	11043	15474		9398	9273		6819	8667	
5	12350	13437		10506	11121		7005	7927	
Wartość średnia:	10672	14826	1.39	9829	10423	1.06	7286	7963	1.09

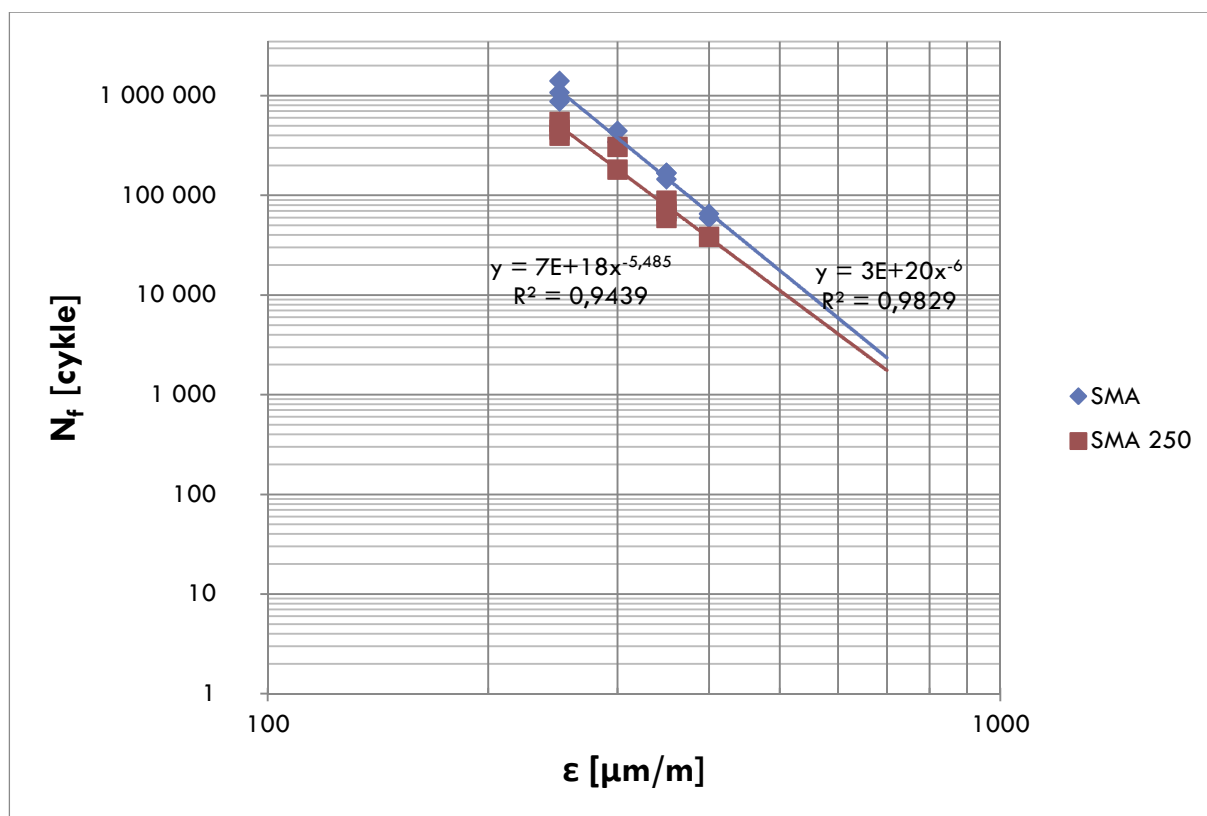
Z tabl. 4-69 wynika, że w temperaturze 10°C mieszanka SMA charakteryzuje się największą sztywnością w porównaniu do mieszanek AC i SMA/MA. Po procesie wygrzewania w temperaturze 250°C sztywność mieszanek SMA i SMA/MA w niedużym stopniu ulega zmianie (mniej niż 10%), natomiast moduł sztywności mieszanki AC wzrósł o prawie 40%. Świadczy to o tym, że beton asfaltowy w procesie wygrzewania w większym stopniu ulega niekorzystnym zmianom prowadzącym do utraty właściwości lepkich na rzecz sztywności kruchego pękania.

Wyniki badań trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych przedstawiono na wykresach zależności funkcyjnych $N_f = f(\varepsilon)$ w skali logarytmicznej. Poprzez realizację liniowej regresji otrzymano równania regresyjne z mocą korelacji wyrażoną współczynnikiem R^2 . Wyniki badań trwałości zmęczeniowej przedstawiono na rys. 4-85 (beton asfaltowy), rys. 4-86 (mieszanka grysowo-mastykowa SMA), rys. 4-87 (mieszanka SMA/MA), rys. 4-88 i rys. 4-89 (wszystkie badane mieszanki).

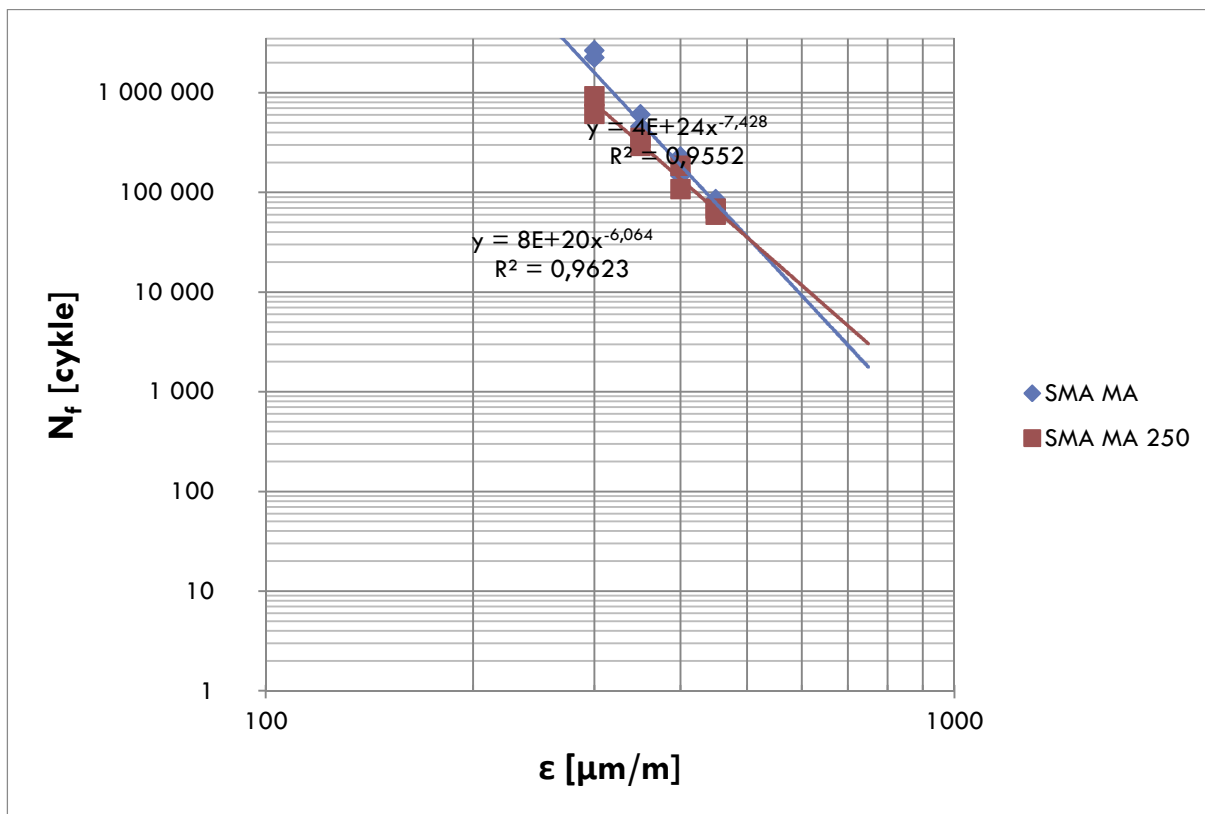
Na uwagę zasługuje wysoka wartość R^2 (powyżej 0.9) co świadczy o dobrym doborze funkcji regresji charakteryzującej obiekt badania.



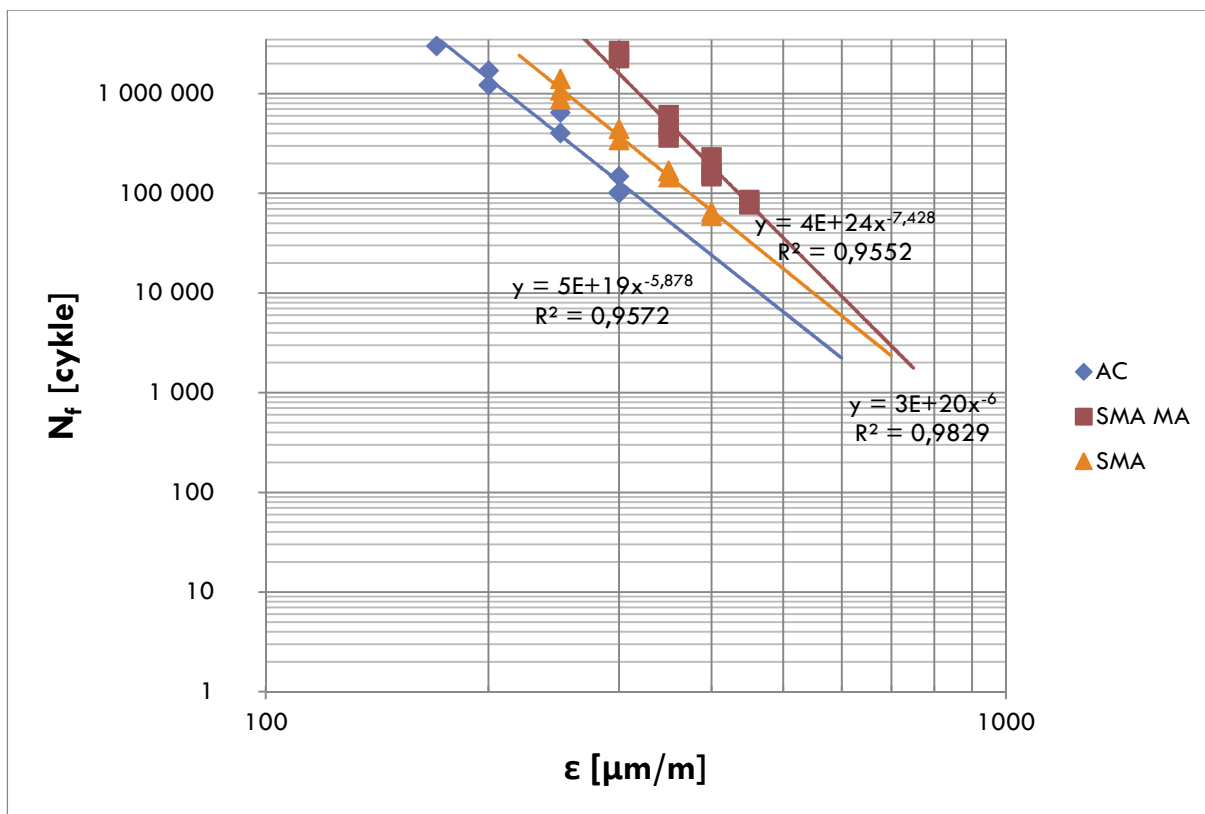
Rys. 4-85 . Wykres trwałości zmęczeniowej betonu asfaltowego AC 11 przed i po procesie wygrzewania w temperaturze 250°C



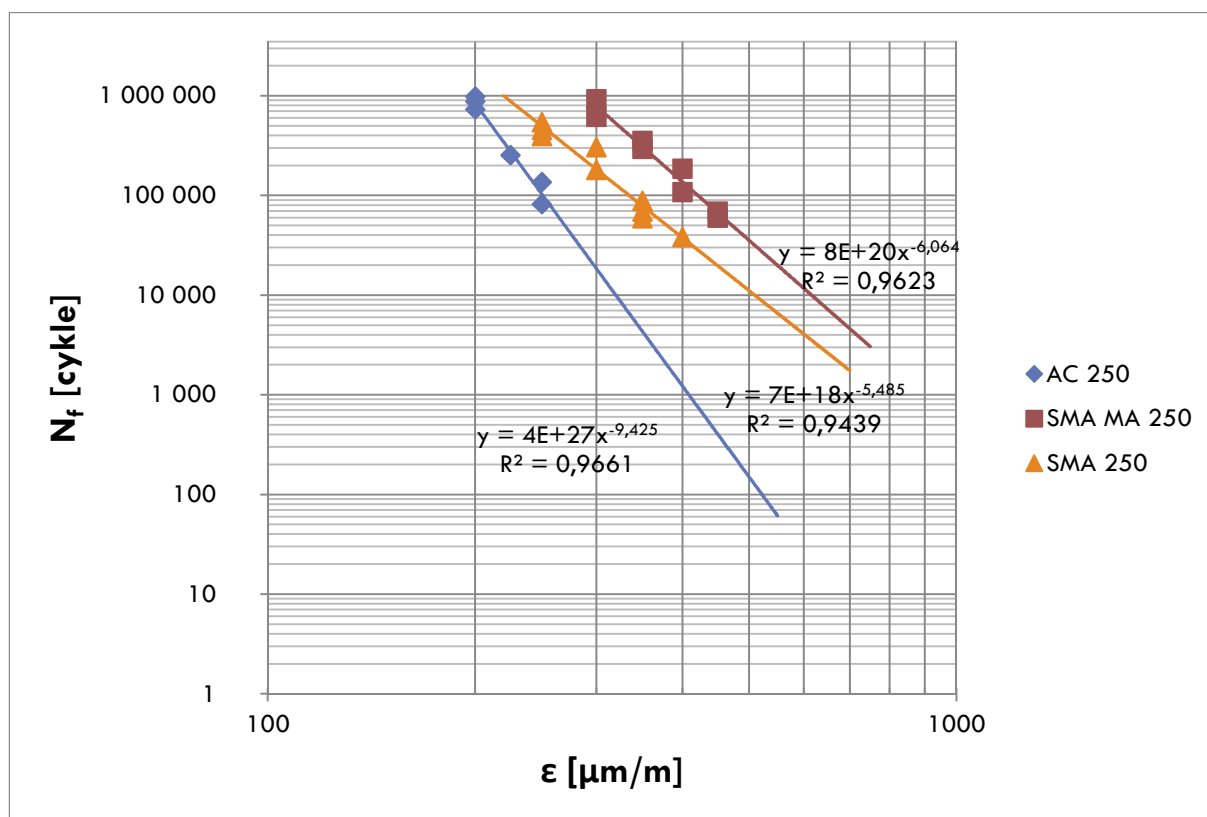
Rys. 4-86 . Wykres trwałości zmęczeniowej mieszanki grysowo-mastyksowej SMA 8 przed i po procesie wygrzewania w temperaturze 250°C



Rys. 4-87 . Wykres trwałości zmęczeniowej mieszanki SMA/MA 8 przed i po procesie wygrzewania w temperaturze 250°C



Rys. 4-88. Wykres trwałości zmęczeniowej mieszanek AC 11, SMA 8 i SMA/MA 8 przed procesem wygrzewania



Rys. 4-89. Wykres trwałości zmęczeniowej mieszanek AC 11, SMA 8 i SMA/MA 8 po procesie wygrzewania w temperaturze 250°C

Z rys. 4-85 wynika, że trwałość zmęczeniowa betonu asfaltowego po procesie wygrzewania w temperaturze 250°C jest dużo mniejsza niż przed wygrzewaniem. Ta różnica wzrasta wraz ze wzrostem wartości odkształcenia (dla odkształcenia $\epsilon = 400 \mu\text{m/m}$ wartość trwałości zmęczeniowej spada z około 25000 do 1000). Znacznie mniejsze spadki trwałości zmęczeniowej występują w przypadku mieszanek SMA i SMA/MA (rys. 4-86 i rys. 4-87). Na rys. 4-88 widać, że dla badanych mieszanek mineralno-asfaltowych mastyksowo-grysowych następuje wyraźne przesunięcie wykresów równań trwałości zmęczeniowej w kierunku wyższych wartości trwałości zmęczeniowej, zgodnie z następującą kolejnością:

- 1) beton asfaltowy AC,
- 2) mieszanka grysowo-mastyksowa SMA,
- 3) mieszanka grysowo-mastyksowa SMA/MA.

Dla tej samej amplitudy odkształcenia, np. $\epsilon = 300 \mu\text{m/m}$ trwałość zmęczeniowa mieszanki SMA jest około 4 razy a mieszanki SMA/MA około 20 razy większa niż trwałość betonu asfaltowego. Jeszcze większe różnice w trwałości zmęczeniowej występują w przypadku mieszanek poddanych procesowi wygrzewania w temperaturze 250°C (rys. 4-89). Dla amplitudy odkształcenia np. $\epsilon = 300 \mu\text{m/m}$ trwałość zmęczeniowa mieszanki SMA jest około 10 razy a mieszanki SMA/MA około 40 razy większa niż trwałość betonu asfaltowego. W tabl. 4-70 przedstawiono wyniki badania indeksu zmiany trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych poddanych procesowi wygrzewania (stosunek trwałości zmęczeniowej po procesie wygrzewania do trwałości zmęczeniowej początkowej).

Tablica 4-70. Indeks zmiany trwałości zmęczeniowej próbek z mieszanek mineralno-asfaltowych poddanych procesowi wygrzewania

Rodzaj mieszanki mineralno-asfaltowej	Indeks zmiany trwałości zmęczeniowej, I_N
Beton asfaltowy AC11 _250	
- odkształcenie ε [$\mu\text{m}/\text{m}$]	
200	0,59
250	0,21
300	0,16
Średnia	0,32
Mastyks grysowy SMA8_250	
- odkształcenie ε [$\mu\text{m}/\text{m}$]	
250	0,42
300	0,62
350	0,45
Średnia	0,50
Mastyks wysokogrysowy SMA/MA8_250	
- odkształcenie ε [$\mu\text{m}/\text{m}$]	
300	0,41
350	0,68
400	0,83
Średnia	0,64

Na podstawie wyników zawartych w tabl. 4-70 można stwierdzić, że wysoka temperatura wygrzewania mieszanki mineralno-asfaltowej w najmniejszym stopniu powoduje zmniejszenie trwałości zmęczeniowej mieszanki SMA/MA, w następnej kolejności mieszanki SMA i betonu asfaltowego AC. Wyniki te korelują z wynikami modułów sztywności zawartymi w tabl. 4-69. Należy ten fakt tłumaczyć tym, że grubość błonki mastyksu otaczającej ziarna kruszywa w mieszance SMA/MA jest największa i w efekcie najmniej podatna na zmiany lepkości pod wpływem wygrzewania.

5 OCENA WPŁYWU ODDZIAŁYWANIA WODY I ŚRODKÓW ODLADZAJĄCYCH, STARZENIA MATERIAŁÓW I OBCIĄŻEŃ RUCHEM POJAZDÓW, NA WŁAŚCIWOŚCI FUNKCJONALNE IZOLACJI I NAWIERZCHNI W ZAKRESIE TEMPERATURY EKSPLOATACYJNEJ

Do izolacji pomostów obiektów inżynierskich oraz warstw nawierzchni mostowych stosuje się mieszanki mineralno-asfaltowe z asfaltami drogowymi oraz z lepiszczami modyfikowanymi polimerem.

Asfalty zastosowane do mieszanek mineralno-asfaltowych stosowane są najczęściej w technologiach na gorąco, w których poddane są oddziaływaniu wysokich temperatur, które w przypadku np. asfaltu lanego mogą wynosić do 240°C. Oddziaływanie wysokich temperatur technologicznych nie powinno zmieniać właściwości normowych i reologicznych stosowanych asfaltów. Jedną z metod stosowaną w normach europejskich, symulacją proces oddziaływania wysokich temperatur technologicznych na asfalty, jest badanie starzenia technologicznego metodą RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test).

Wbudowane w konstrukcje nawierzchni mostowych izolacje asfaltowe oraz mieszanki mineralno-asfaltowe z tymi asfaltami poddane są oddziaływaniu różnych czynników niszczących a przede wszystkim ruchu samochodowego i oddziaływania środowiska, w tym zmiennych temperatur eksploatacyjnych, wody i mrozu, promieni ultrafioletowych, itp. Wymienione czynniki nazywamy starzeniem eksploatacyjnym, które związane jest z trwałością obiektu mostowego. Starzenie eksploatacyjne asfaltów określa się metodą PAV (Pressure Aging Vessel).

Standardowe metody badań lepiszczy nie pozwalają na przewidywanie i ocenę właściwości funkcjonalnych lepiszcza, tj. jego zachowania się w pełnym zakresie temperatur eksploatacyjnych nawierzchni drogowej [35]. Realizowany w USA obszerny program badawczy Strategic Highway Research Program SHRP pozwolił na opracowanie oceny jakości i trwałości lepiszczy i mieszanek mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem rzeczywistych warunków eksploatacji nawierzchni. Opracowane wymagania funkcjonalne dla lepiszczy oraz metody badań pozwoliły na identyfikację rodzajów zniszczeń nawierzchni, takich jak: trwałe deformacje plastyczne, zmęczenie, spękania niskotemperaturowe. W programie SHRP bada się lepiszcza za pomocą tych samych oznaczeń na trzech poziomach ich właściwości [35]:

- oryginalnego lepiszcza, jakim jest asfalt po wyprodukowaniu,
- lepiszcza po starzeniu technologicznym, po badaniu RTFOT,
- lepiszcza po starzeniu technologicznym i eksploatacyjnym, po badaniu RTFOT + PAV.

Wg programu SHRP określa się odkształcenie (koleiny) asfaltu w wysokich temperaturach użytkowych w zakresie 45-85°C w reometrze dynamicznego DSR, określając parametr $G^*/\sin \delta$ (lepiszcze oryginalne i po RTFOT). W średnich temperaturach eksploatacyjnych nawierzchni w zakresie 0-40°C określa się odporność na zmęczenie w aparacie DSR, oznaczając parametr $G^* \cdot \sin \delta$. Odporność lepiszcza na niskie temperatury (pękanie) w zakresie od 0 do -3°C, określa się w aparacie BBR na podstawie obliczonego modułu sztywności S oraz parametru zmiany sztywności m .

W celu oceny właściwości lepkosprężystych lepiszczy i ich przydatności do wykonywania warstwy izolacji oraz warstw ochronnej i ścieralnej nawierzchni mostowej przeprowadzono badania wg metodyki SHRP. Wyniki badań asfaltu 50/70 zestawiono w tabl. 5-1, 5-2, 5-3 i 5-4 a wyniki badań polimeroasfaltów w tabl. 5-5, 5-6, 5-7, 5-8 i 5-9.

5.1 Badanie asfaltu i asfaltu modyfikowanego stosowanego do izolacji i nawierzchni przed i po starzeniu RTFOT i PAV

Wymagania i klasyfikacja lepiszczy asfaltowych wg norm PN-EN

Wymagania dla asfaltów drogowych o penetracji od $20 \cdot 0,1$ mm do $220 \cdot 0,1$ mm, określa norma PN-EN 12591:2010 [N2], w której podano podstawowe wymagania klasyfikacyjne dla asfaltów drogowych. Wymagania odnośnie asfaltów drogowych przedstawiono w punkcie 4.1.1 w tabl. 4-1A oraz 4-1B.

Wymagania dla polimeroasfaltów wg PN-EN 14023:2011 [N3] podano w punkcie 4.1.1 w tabl. 4-2.

Program badań lepiszczy asfaltowych w funkcji starzenia

W celu oceny odporności na starzenie asfaltów i polimeroasfaltów przeprowadzono obszerne badania właściwości normowych i reologicznych w funkcji starzenia.

Program badań asfaltów drogowych i polimeroasfaltów obejmował:

- badania podstawowe i reologiczne lepiszczy oryginalnych (niestarzonych),
- badania podstawowe i reologiczne lepiszczy poddanych starzeniu RTFOT wg PN-EN 12607-1 [N29],
- badania podstawowe i reologiczne lepiszczy poddanych starzeniu RTFOT i PAV wg PN-EN 14769 [N30].

Badania cech podstawowych (normowych) asfaltów drogowych wykonano zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12591 [N2] a badania właściwości polimeroasfaltów zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 14023 [N3]. Badania wg powyższych norm są niezbędne do klasyfikacji lepiszczy asfaltowych pod względem zgodności z obowiązującymi wymaganiami i należą do grupy badań klasyfikacyjnych. Ze względu na konieczność pełnej oceny właściwości lepko-sprężystych lepiszczy asfaltowych, oprócz badań podstawowych należy przeprowadzić również zaawansowane badania reologiczne lepiszczy, takie jak: lepkość dynamiczna, badanie sztywności pełzania w reometrze zginanej belki (BBR) oraz badanie modułu zespolonego i kąta przesunięcia fazowego w reometrze dynamicznego ścinania (DSR).

Badania reologiczne przeprowadzono zgodnie z metodyką amerykańskiego programu badawczego SHRP, w całym zakresie temperatur technologicznych i eksploatacyjnych. W przedziale temperatur od 0 do 135°C badania przeprowadzono w lepkościomierzu Brookfielda oraz w reometrze DSR a w przedziale temperatur od -30 do 0°C w reometrze BBR.

Badanie lepkości dynamicznej w aparacie Brookfielda służy do oceny konsystencji lepiszczy asfaltowych w wysokiej temperaturze ($100 - 180^{\circ}\text{C}$), co umożliwia ustalanie temperatury procesów technologicznych. Badanie lepkości pozwala w szybki sposób kontrolować zmiany konsystencji lepiszcza asfaltowego, w szerokim zakresie temperatur technologicznych, co podczas procesu modyfikacji jest szczególnie istotne. Wiedza dotycząca lepkości dynamicznej asfaltu wyjściowego jest niezbędna do ustalenia temperatur podstawowych procesów technologicznych.

Na podstawie badań zespolonego modułu sztywności G^* i kąta przesunięcia fazowego δ w reometrze dynamicznego ścinania (DSR) można określić odporność asfaltów wyjściowych na trwałe odkształcenia wysokotemperaturowe [6]. Stosowanie nowych metod badawczych wg programu SHRP jest zgodne z aktualnymi kierunkami badań na świecie. Przewiduje się, że nowe metody badań (BBR i DSR) w przyszłości zastąpią obecnie stosowane metody pomiarowe i zostaną wprowadzone do wymagań podstawowych (normowych). Obecnie w Stanach Zjednoczonych wykorzystuje się je powszechnie do klasyfikacji lepiszczy na podstawie wymagań Superpave. Zgodnie z programem SHRP

określono odporność asfaltów w wysokich temperaturach na deformacje trwałe, określając parametr $G^*/\sin \delta$, odporność na zmęczenie w średnich temperaturach eksploatacyjnych określając iloczyn $G^* \cdot \sin \delta$.

Zgodnie z SHRP odporność lepiszcza na spękania niskotemperaturowe przeprowadzono w reometrze zginanej belki BBR, określając dla asfaltów poddanych starzeniu metodą RTFOT i PAV sztywność pełzania S wyznaczającą temperaturę graniczną przejścia asfaltu z bezpiecznego stanu lepkosprężystego w niekorzystny stan sprężysty, kruchy.

Wykonano ponadto badanie specjalne, polegające na określeniu składu grupowego lepiszczy. Właściwości fizykochemiczne i reologiczne asfaltów, zdolność reagowania z modyfikatorami oraz ich zachowanie w nawierzchniach drogowych zależą od składu i struktury chemicznej tych materiałów. Badanie struktury chemicznej lepiszczy polega na rozdzieleniu lepiszcza na frakcje o podobnej naturze chemicznej i zbliżonej masie cząsteczkowej, które nazywane są składnikami grupowymi a metoda badania nosi nazwę analizy grupowej.

Polimeroasfalty poddano dodatkowo badaniom właściwości podstawowych wg PN-EN 14023 [N3] oraz właściwości reologicznych wg procedury programu SHRP. Przeprowadzono badania charakterystyczne dla asfaltów modyfikowanych, takie jak: nawrót sprężysty, kohezja (energia umowna odkształcenia) oraz określono stabilność magazynowania polimeroasfaltów.

Badanie nawrotu sprężystego, stosowane dla asfaltów modyfikowanych, jest bardzo istotne do oceny właściwości sprężystych lepiszczy w średnich temperaturach eksploatacyjnych. W celu określenia i porównania właściwości sprężystych lepiszczy modyfikowanych przeprowadzono pomiar nawrotu sprężystego w temperaturze 25°C.

Miarą kohezji lepiszczy asfaltowych jest wartość siły rozciągającej w badaniu ciągłości z pomiarem siły. Oznaczenie siły rozciągającej wykonano w duktylometrze z pomiarem siły, co pozwoliło na obliczenie energii odkształcenia polimeroasfaltów. W trakcie badania określono siłę rozciągającą oraz wydłużenie polimeroasfaltów w temperaturze 5°C, 10°C, 15°C i 20°C.

Właściwości asfaltów drogowych i polimeroasfaltów określono dla lepiszczy oryginalnych (niestarzonych), dla lepiszczy poddanych procesowi starzenia metodą Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) symulującej starzenie technologiczne oraz dla lepiszczy poddanych procesowi starzenia metodą Pressure Aging Vessel (PAV) symulującej starzenie eksploatacyjne.

Szczegółowy program badań lepiszczy oryginalnych (nie starzonych) stosowanych do izolacji i nawierzchni mostowych przedstawiono poniżej:

- określenie składu grupowego: zawartości asfaltenów, żywic oraz olejów,
- pomiar penetracji w temperaturze 5°C, 15°C i 25°C,
- pomiar temperatury mięknięcia wg PiK,
- pomiar temperatury łamliwości wg Fraassa,
- obliczenie przedziału plastyczności,
- obliczenie indeksu penetracji (PI),
- określenie lepkości wg Brookfielda w temperaturze 90°C, 110°C i 135°C,
- określenie parametru m (pomiar w aparacie BBR) w temperaturze -6°C, -12°C, -18°C, -24°C i -30°C,
- określenie wielkości S (pomiar w aparacie BBR) w temperaturze -6°C, -12°C, -18°C, -24°C i -30°C,
- określenie w aparacie DSR maksymalnej temperatury, dla której $G^*/\sin \delta \geq 1 \text{ kPa}$,

- określenie w aparacie DSR wielkości modułu zespolonego G^* w temperaturze -20°C , 0°C , 20°C , 40°C , 60°C i 80°C ,
- określenie w aparacie DSR wielkości kąta przesunięcia fazowego δ w temperaturze -20°C , 0°C , 20°C , 40°C , 60°C i 80°C ,
- określenie ciągliwości z pomiarem siły- energii odkształcenia w temperaturze 20°C , 15°C , 10°C i 5°C (tylko polimeroasfalty),
- określenie nawrotu sprężystego w 25°C (tylko polimeroasfalty),
- określenie stabilności magazynowania polimeroasfaltów – różnica w temperaturze mięknienia,
- określenie stabilności magazynowania polimeroasfaltów – różnica w penetracji.

Szczegółowy program badań lepiszczy poddanych starzeniu RTFOT (starzenie technologiczne), stosowanych do izolacji i nawierzchni mostowych przedstawiono poniżej:

- pomiar penetracji w temperaturze 5°C , 15°C i 25°C ,
- określenie pozostałej penetracji w 25°C po starzeniu RTFOT,
- wzrost temperatury mienienia wg PiK po starzeniu RTFOT,
- pomiar temperatury łamliwości wg Fraassa,
- obliczenie przedziału plastyczności,
- obliczenie indeksu penetracji (PI),
- określenie lepkości wg Brookfielda w temperaturze 90°C , 110°C i 135°C ,
- określenie parametru m (pomiar w aparacie BBR) w temperaturze -6°C , -12°C , -18°C , -24°C i -30°C ,
- określenie wielkości S (pomiar w aparacie BBR) w temperaturze -6°C , -12°C , -18°C , -24°C i -30°C ,
- określenie w aparacie DSR maksymalnej temperatury, dla której $G^*/\sin \delta \geq 2,2\text{kPa}$,
- określenie w aparacie DSR wielkości modułu zespolonego G^* w temperaturze -20°C , 0°C , 20°C , 40°C , 60°C i 80°C ,
- określenie w aparacie DSR wielkości kąta przesunięcia fazowego δ w temperaturze -20°C , 0°C , 20°C , 40°C , 60°C i 80°C ,
- określenie ciągliwości z pomiarem siły- energii odkształcenia w temperaturze 20°C , 15°C , 10°C i 5°C (tylko polimeroasfalty),
- określenie nawrotu sprężystego w 25°C po starzeniu (tylko polimeroasfalty).

Szczegółowy program badań lepiszczy stosowanych do izolacji i nawierzchni mostowych, poddanych starzeniu RTFOT + PAV (starzenie eksploatacyjne) przedstawiono poniżej:

- pomiar penetracji w temperaturze 5°C , 15°C i 25°C ,
- określenie pozostałej penetracji w 25°C po starzeniu RTFOT+PAV,
- wzrost temperatury mięknienia PiK po starzeniu RTFOT+PAV,
- pomiar temperatury łamliwości wg Fraassa,
- obliczenie przedziału plastyczności,
- obliczenie indeksu penetracji (PI),
- określenie lepkości wg Brookfielda w temperaturze 90°C , 110°C i 135°C ,
- określenie parametru m (pomiar w aparacie BBR) w temperaturze -6°C , -12°C , -18°C , -24°C i -30°C ,
- określenie wielkości S (pomiar w aparacie BBR) w temperaturze -6°C , -12°C , -18°C , -24°C i -30°C ,
- określenie w aparacie DSR minimalnej temperatury, dla której $G^*\sin \delta \leq 5000\text{kPa}$,

- określenie w aparacie DSR wielkości modułu zespolonego G^* w temperaturze -20°C , 0°C , 20°C , 40°C , 60°C i 80°C ,
- określenie w aparacie DSR wielkości kąta przesunięcia fazowego δ w temperaturze -20°C , 0°C , 20°C , 40°C , 60°C i 80°C .

Wyniki badań asfaltów niemodyfikowanych w funkcji starzenia

Wyniki badań właściwości podstawowych i reologicznych lepiszczy wyjściowych, oryginalnych przedstawiono w tabl. 5-1, lepiszczy wyjściowych po starzeniu technologicznym RTFOT w tabl. 5-2 i lepiszczy wyjściowych po starzeniu eksploatacyjnym RTFOT+PAV w tabl. 5-3. Wynik określony literą „D” oznacza brak możliwości pomiaru spowodowany zbyt dużym ugięciem lub złamaniem próbki w zależności od temperatury badania.

Tablica 5-1 . Wyniki badań asfaltu drogowego 50/70 niestarszonego

Właściwość	Norma	Jednostka	50/70	
			Wynik	Wymagania wg PN-EN 12591
Skład grupowy: asfalteny	BN-0538-02 [N31]	%	17,32	-
Skład grupowy: żywice	BN-0538-02	%	45,6	-
Skład grupowy: oleje	BN-0538-02	%	37,08	-
Penetracja, 5°C	PN-EN 1426 [N4]	0,1 mm	7	-
Penetracja, 15°C	PN-EN 1426	0,1 mm	23	-
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	52	50-70
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427 [N5]	°C	50,6	46-54
Temperatura łamliwości wg Fraassa	PN-EN 12593 [N32]	°C	-12	≤ -8
Przedział plastyczności	PN-EN 14023 [N3]	°C	63	-
Indeks penetracji PI	PN-EN 12591 Załącznik A [N2]	-	-1,0	-1,5÷+0,7
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302 [N6]	Pa·s	10,35	-
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	2,12	-
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	0,49	-
Parametr m (BBR), -6°C	PN-EN 14771 [N33]	-	0,513	-
Parametr m (BBR), -12°C	PN-EN 14771	-	0,41	-
Parametr m (BBR), -18°C	PN-EN 14771	-	0,321	-
Parametr m (BBR), -24°C	PN-EN 14771	-	0,241	-
Parametr m (BBR), -30°C	PN-EN 14771	-	D ¹	-
Sztywność pełzania S (BBR), -6°C	PN-EN 14771	MPa	37,2	-
Sztywność pełzania S (BBR), -12°C	PN-EN 14771	MPa	112,0	-
Sztywność pełzania S (BBR), -18°C	PN-EN 14771	MPa	290,0	-
Sztywność pełzania S (BBR), -24°C	PN-EN 14771	MPa	660,0	-
Sztywność pełzania S (BBR), -30°C	PN-EN 14771	MPa	D ¹	-
(DSR): max temperatura, w której $G^*/\sin\delta \geq 1 \text{ kPa}$	-	°C	65 ($G^*/\sin\delta = 1.682 \text{ kPa}$)	-
Moduł zespolony G^* (DSR), -20°C	PN-EN 14770 [N34]	kPa	150600,0	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 0°C	PN-EN 14770	kPa	65298,0	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 20°C	PN-EN 14770	kPa	3074,2	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 40°C	PN-EN 14770	kPa	74,1	-

Moduł zespolony G^* (DSR), 60°C	PN-EN 14770	kPa	3,2	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 80°C	PN-EN 14770	kPa	0,3	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), -20°C	PN-EN 14770	°	0,52	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 0°C	PN-EN 14770	°	3,18	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 20°C	PN-EN 14770	°	41,94	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 40°C	PN-EN 14770	°	73,22	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 60°C	PN-EN 14770	°	83,93	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 80°C	PN-EN 14770	°	88,05	-

(¹) - brak możliwości dokonania pomiaru z powodu zbyt dużego ugięcia lub złamania próbki

Tablica 5-2. Wyniki badań asfaltu drogowego 50/70 po starzeniu RTFOT

Właściwość	Norma	Jednostka	50/70	
			Wynik	Wymagania wg PN-EN 12591
Penetracja, 5°C	PN-EN 1426 [N4]	0,1 mm	5	-
Penetracja, 15°C	PN-EN 1426	0,1 mm	15	-
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	30	-
Pozostała penetracja, 25°C	PN-EN 1426	%	57,7	≥ 50
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427 [N5]	°C	54,4	-
Wzrost temperatury mięknięcia	PN-EN 1427	°C	3,8	≤ 9
Temperatura łamliwości wg Fraassa	PN-EN 12593 [N32]	°C	-12	-
Przedział plastyczności	PN-EN 14023 [N3]	°C	66,4	-
Indeks penetracji PI	PN-EN 12591 Załącznik A [N2]	-	-1,2	-
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302 [N6]	Pa·s	21,25	-
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	3,78	-
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	0,76	-
Parametr m (BBR), -6°C	PN-EN 14771 [N33]	-	0,443	-
Parametr m (BBR), -12°C	PN-EN 14771	-	0,358	-
Parametr m (BBR), -18°C	PN-EN 14771	-	0,296	-
Parametr m (BBR), -24°C	PN-EN 14771	-	0,203	-
Parametr m (BBR), -30°C	PN-EN 14771	-	0,138	-
Sztywność pełzania S (BBR), -6°C	PN-EN 14771	MPa	56,3	-
Sztywność pełzania S (BBR), -12°C	PN-EN 14771	MPa	149,0	-
Sztywność pełzania S (BBR), -18°C	PN-EN 14771	MPa	340,0	-
Sztywność pełzania S (BBR), -24°C	PN-EN 14771	MPa	652,0	-
Sztywność pełzania S (BBR), -30°C	PN-EN 14771	MPa	1140,0	-
(DSR): max temperatura, w której $G^*/\sin \delta \geq 2.2 \text{ kPa}$	-	°C	65 ($G^*/\sin \delta = 3.76 \text{ kPa}$)	-
Moduł zespolony G^* (DSR), -20°C	PN-EN 14770 [N34]	kPa	69846,0	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 0°C	PN-EN 14770	kPa	45076,0	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 20°C	PN-EN 14770	kPa	5873,9	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 40°C	PN-EN 14770	kPa	153,4	-

Moduł zespolony G^* (DSR), 60°C	PN-EN 14770	kPa	7,4	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 80°C	PN-EN 14770	kPa	0,6	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), -20°C	PN-EN 14770	°	0,50	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 0°C	PN-EN 14770	°	2,44	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 20°C	PN-EN 14770	°	31,67	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 40°C	PN-EN 14770	°	67,18	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 60°C	PN-EN 14770	°	80,41	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 80°C	PN-EN 14770	°	86,81	-

Tablica 5-3. Wyniki badań asfaltu drogowego 50/70 po starzeniu RTFOT+PAV

Właściwość	Norma	Jednostka	50/70
			Wynik
Penetracja, 5°C	PN-EN 1426 [N4]	0,1 mm	3
Penetracja, 15°C	PN-EN 1426	0,1 mm	10
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	20
Pozostała penetracja, 25°C	PN-EN 1426	%	38,1
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427 [N5]	°C	64,6
Wzrost temperatury mięknięcia	PN-EN 1427	°C	14,0
Temperatura łamliwości wg Fraassa	PN-EN 12593 [N32]	°C	-6
Przedział plastyczności	PN-EN 14023 [N3]	°C	70,6
Indeks penetracji PI	PN-EN 12591 Załącznik A [N2]	-	-0,1
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302 [N6]	Pa·s	67,83
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	8,99
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	1,44
Parametr m (BBR), -6°C	PN-EN 14771 [N33]	-	0,353
Parametr m (BBR), -12°C	PN-EN 14771	-	0,297
Parametr m (BBR), -18°C	PN-EN 14771	-	0,246
Parametr m (BBR), -24°C	PN-EN 14771	-	0,192
Parametr m (BBR), -30°C	PN-EN 14771	-	0,124
Sztywność pełzania S (BBR), -6°C	PN-EN 14771	MPa	101,0
Sztywność pełzania S (BBR), -12°C	PN-EN 14771	MPa	222,0
Sztywność pełzania S (BBR), -18°C	PN-EN 14771	MPa	426,0
Sztywność pełzania S (BBR), -24°C	PN-EN 14771	MPa	749,0
Sztywność pełzania S (BBR), -30°C	PN-EN 14771	MPa	931,0
(DSR): min temperatura, w której $G^* \cdot \sin \delta \leq 5000 \text{ kPa}$	-	°C	30 ($G^* \cdot \sin \delta = 4179,3 \text{ kPa}$)
Moduł zespolony G^* (DSR), -20°C	PN-EN 14770 [N34]	kPa	81384,0
Moduł zespolony G^* (DSR), 0°C	PN-EN 14770	kPa	50966,0
Moduł zespolony G^* (DSR), 20°C	PN-EN 14770	kPa	10435,9
Moduł zespolony G^* (DSR), 40°C	PN-EN 14770	kPa	511,4

Moduł zespolony G^* (DSR), 60°C	PN-EN 14770	kPa	30,7
Moduł zespolony G^* (DSR), 80°C	PN-EN 14770	kPa	2,4
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), -20°C	PN-EN 14770	°	0,44
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 0°C	PN-EN 14770	°	1,65
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 20°C	PN-EN 14770	°	16,95
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 40°C	PN-EN 14770	°	55,12
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 60°C	PN-EN 14770	°	70,90
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 80°C	PN-EN 14770	°	81,89

W tabl. 5-4 zestawiono obliczone wartości wyrażenia $G^*/\sin \delta$, będącego miarą odporności asfaltu 50/70 na deformacje trwałe oraz wartości wyrażenia $G^*\sin \delta$, będącego miarą odporności na zmęczenie asfaltu 50/70. Wyrażenia te obliczono na podstawie wyników badań modułu sztywności G^* oraz kąta przesunięcia fazowego δ asfaltu przeprowadzonych w reometrze dynamicznego ścinania DSR z uwzględnieniem procesów starzenia.

Tablica 5-4. Parametry obliczone na podstawie badań asfaltu drogowego 50/70 w reometrze DSR

Temperatura [°C]	50/70		
	Lepiszcz niestarzone $G^*/\sin \delta$, [kPa]	Lepiszcz po RTFOT $G^*/\sin \delta$, [kPa]	Lepiszcz po RTFOT+PAV $G^*\sin \delta$, [kPa]
-20	-	-	457,2
0	-	-	1529,4
20	4339,4	10021,8	3754,8
40	89,5	174,0	349,4
60	6,5	11,6	-
80	0,95	1,5	-
Wymaganie - temperatura, w której:	$G^*/\sin \delta \geq 1,0$	$G^*/\sin \delta \geq 2,2$	$G^*\sin \delta \leq 5000$

Wyniki badań asfaltu 50/70 zestawione w tabl. 5-4 wskazują, że asfalt przed starzeniem i po starzeniu RTFOT spełnia wymagania SHRP dotyczących odporności na odkształcenia (koleiny) w zakresie temperatur 20 do 60°C. Spełnienie wymagań odnośnie parametru $G^*/\sin \delta$ w temperaturze 60°C jest wystarczające by w nawierzchni nie powstawały odkształcenia trwałe. Odporność na zmęczenie po starzeniu RTFOT+PAV w średnich temperaturach eksploatacyjnych od 0 do 20°C spełnia wymagania SHRP. Asfalt taki nie powinien wykazywać spękań zmęczeniowych w zakresie tych temperatur.

Na podstawie wyników badań asfaltu 50/70 można stwierdzić, że w zakresie temperatur dodatnich od 0 do 60°C asfalt wykazuje wystarczającą odporność na starzenie.

Wyniki badań odporności asfaltu na pękanie w niskich temperaturach, określone w reometrze zginanej belki BBR, wskazują że asfalt oryginalny (przed starzeniem) nie pęka wskutek skurczu w temperaturze -18°C . Procesy starzeniowe zachodzące podczas starzenia technologicznego RTFOT oraz starzenia eksploatacyjnego RTFOT+PAV powodują, że temperatura przejścia asfaltu ze stanu lepkosprężystego w stan sprężysty, kruchy wzrasta i wynosi -12°C .

Pozostałe wyniki badań lepiszczy po starzeniu (tabl. 5-2 i 5-3), takie jak: pozostała penetracja, indeks penetracji, wzrost temperatury mięknięcia, wskazują na odporność badanych lepiszczy na procesy starzeniowe zachodzące w temperaturach technologicznych i w czasie eksploatacji nawierzchni.

Wyniki badań polimeroasfaltów w funkcji starzenia

Podstawowe wyniki badań polimeroasfaltów niestarczonych przedstawiono w tablicy 5-5, po starzeniu technologicznym RTFOT w tabl. 5-6 i po starzeniu eksploatacyjnym RTFOT+PAV w tabl. 5-7. Otrzymane wyniki badań będą stanowiły podstawę do analizy porównawczej umożliwiającej ocenę wpływu starzenia technologicznego i eksploatacyjnego na właściwości polimeroasfaltów stosowanych do izolacji i nawierzchni mostowych.

Tablica 5-5. Wyniki badań polimeroasfaltów niestarczonych (oryginalnych)

Właściwość	Norma	Jednostka	PmB 25/55-60		PmB 45/80-55	
			Wynik	Wymagania wg PN-EN 14023	Wynik	Wymagania wg PN-EN 14023
Skład grupowy: asfalteny	BN-0538-02 [N31]	%	17,87	-	12,56	-
Skład grupowy: żywice	BN-0538-02	%	46,34	-	48,89	-
Skład grupowy: oleje	BN-0538-02	%	35,79	-	38,55	-
Penetracja, 5°C	PN-EN 1426 [N4]	0,1 mm	5	-	7	-
Penetracja, 15°C	PN-EN 1426	0,1 mm	13	-	18	-
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	34	25-55	52	45-80
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427 [N5]	°C	61,3	≥60	57,8	≥55
Temperatura łamliwości wg Fraassa	PN-EN 12593 [N32]	°C	-10	≤-10	-13	≤-12
Przedział plastyczności	PN-EN 14023 [N3]	°C	71,3	TBR	70,8	TBR
Indeks penetracji PI	PN-EN 12591 Załącznik A [N2]	-	0,4	-	0,7	-
Energia umowna odkształcenia $E'_s=E'_{0,4}-E'_{0,2}$ w temp. 20°C	PN-EN 13589 [N35] PN-EN 13703 [N36]	J/cm ²	1,10	-	0,77	-
Energia umowna odkształcenia $E'_s=E'_{0,4}-E'_{0,2}$ w temp. 15°C	PN-EN 13589 PN-EN 13703	J/cm ²	2,40	-	1,76	-
Energia umowna odkształcenia $E'_s=E'_{0,4}-E'_{0,2}$ w temp. 10°C	PN-EN 13589 PN-EN 13703	J/cm ²	5,53	-	4,07	-
Energia umowna odkształcenia $E'_s=E'_{0,4}-E'_{0,2}$ w temp. 5°C	PN-EN 13589 PN-EN 13703	J/cm ²	9,96 (373,2 mm) ¹	≥ 1	9,68	≥ 1
Nawrót sprężysty w 25°C	PN-EN 13398 [N37]	%	62,5	≥ 50	85,0	≥ 50
Stabilność składowania – różnica w temperaturze mięknięcia	PN-EN 13399 [N38]	°C	0,2	≤ 5	0,5	≤ 5
Stabilność składowania, różnica w penetracji	PN-EN 13399	0,1 mm	3,3	-	1,3	-
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302 [N6]	Pa·s	55,31	-	59,33	-
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	8,83	-	6,93	-
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	1,68	-	1,17	-
Parametr m (BBR), -6°C	PN-EN 14771 [N33]	-	0,425	-	0,49	-
Parametr m (BBR), -12°C	PN-EN 14771	-	0,357	-	0,398	-

Parametr m (BBR), -18°C	PN-EN 14771	-	0,278	-	0,311	-
Parametr m (BBR), -24°C	PN-EN 14771	-	0,213	-	0,225	-
Parametr m (BBR), -30°C	PN-EN 14771	-	0,158	-	0,173	-
Sztywność pełzania S (BBR), -6°C	PN-EN 14771	MPa	67,8	-	43,8	-
Sztywność pełzania S (BBR), -12°C	PN-EN 14771	MPa	151,0	-	112,0	-
Sztywność pełzania S (BBR), -18°C	PN-EN 14771	MPa	371,0	-	289,0	-
Sztywność pełzania S (BBR), -24°C	PN-EN 14771	MPa	661,0	-	574,0	-
Sztywność pełzania S (BBR), -30°C	PN-EN 14771	MPa	1060,0	-	997,0	-
(DSR): max temperatura, w której $G^*/\sin \delta \geq 1 \text{ kPa}$	-	°C	80 ($G^*/\sin \delta = 1.54 \text{ kPa}$)	-	75 ($G^*/\sin \delta = 1.49 \text{ kPa}$)	-
Moduł zespolony G^* (DSR), -20°C	PN-EN 14770 [N34]	kPa	61072,0	-	177600,0	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 0°C	PN-EN 14770	kPa	42576,0	-	62770,0	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 20°C	PN-EN 14770	kPa	5400,7	-	2960,0	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 40°C	PN-EN 14770	kPa	168,2	-	81,7	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 60°C	PN-EN 14770	kPa	12,8	-	6,0	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 80°C	PN-EN 14770	kPa	1,5	-	0,9	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), -20°C	PN-EN 14770	°	0,52	-	0,55	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 0°C	PN-EN 14770	°	2,61	-	3,27	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 20°C	PN-EN 14770	°	30,10	-	43,01	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 40°C	PN-EN 14770	°	61,62	-	65,92	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 60°C	PN-EN 14770	°	66,84	-	67,33	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 80°C	PN-EN 14770	°	78,12	-	71,63	-

(¹) – rozciągnięcie próbki w momencie zerwania

Tablica 5-6. Wyniki badań polimeroasfaltów po starzeniu RTFOT

Właściwość	Norma	Jednostka	PmB 25/55-60		PmB 45/80-55	
			Wynik	Wymagania wg PN-EN 14023	Wynik	Wymagania wg PN-EN 14023
Penetracja, 5°C	PN-EN 1426 [N4]	0,1 mm	5	-	6	-
Penetracja, 15°C	PN-EN 1426	0,1 mm	9	-	15	-
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	25	-	32	-
Pozostała penetracja, 25°C	PN-EN 12607-1 [N29] PN-EN 1426 [N4]	%	73	≥ 60	61,1	≥ 60
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427 [N5]	°C	70,5	-	65,1	-
Wzrost temperatury mięknięcia po starzeniu	PN-EN 12607-1 PN-EN 1427	°C	9,2	≤ 8	7,3	≤ 8
Temperatura łamliwości wg Fraassa	PN-EN 12593 [N32]	°C	-10	-	-14	-
Przedział plastyczności	PN-EN 14023 [N3]	°C	80,5	-	79,1	-
Indeks penetracji PI	PN-EN 12591 Załącznik A [N2]	-	1,3	-	0,9	-
Energia umowna odkształcenia $E'_s=E'_{0,4}-E'_{0,2}$ w temp. 20°C	PN-EN 13589 [N35] PN-EN 13703 [N36]	J/cm ²	2,05	-	1,29	-
Energia umowna odkształcenia $E'_s=E'_{0,4}-E'_{0,2}$ w temp. 15°C	PN-EN 13589 PN-EN 13703	J/cm ²	4,55	-	2,98	-
Energia umowna odkształcenia $E'_s=E'_{0,4}-E'_{0,2}$ w temp. 10°C	PN-EN 13589 PN-EN 13703	J/cm ²	8,36	-	6,21	-
Energia umowna odkształcenia $E'_s=E'_{0,4}-E'_{0,2}$ w temp. 5°C	PN-EN 13589 PN-EN 13703	J/cm ²	7,00 (296.5 mm) ¹	≥ 1	0,00 (58.8 mm) ¹	≥ 1
Nawrót sprężysty w 25°C po starzeniu	PN-EN 13398 [N37]	%	74	≥ 50	76,75	≥ 50
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302 [N6]	Pa·s	128,55	-	87,625	-
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	17,04	-	11,39	-
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	2,64	-	1,70	-
Parametr m (BBR), -6°C	PN-EN 14771 [N33]	-	0,375	-	0,429	-
Parametr m (BBR), -12°C	PN-EN 14771	-	0,314	-	0,349	-
Parametr m (BBR), -18°C	PN-EN 14771	-	0,25	-	0,288	-
Parametr m (BBR), -24°C	PN-EN 14771	-	0,204	-	0,225	-
Parametr m (BBR), -30°C	PN-EN 14771	-	0,156	-	0,165	-
Szywność pełzania S (BBR), -6°C	PN-EN 14771	MPa	89,7	-	60,0	-
Szywność pełzania S (BBR), -12°C	PN-EN 14771	MPa	187,0	-	149,0	-
Szywność pełzania S (BBR), -18°C	PN-EN 14771	MPa	411,0	-	326,0	-
Szywność pełzania S (BBR), -24°C	PN-EN 14771	MPa	717,0	-	647,0	-

Sztywność pełzania S (BBR), -30°C	PN-EN 14771	MPa	1090,0	-	887,0	-
(DSR): max temperatura, w której $G^*/\sin \delta \geq 2.2\text{kPa}$	-	°C	80 ($G^*/\sin \delta = 3.40\text{kPa}$)	-	75 ($G^*/\sin \delta = 2.43\text{kPa}$)	-
Moduł zespolony G^* (DSR), -20°C	PN-EN 14770 [N34]	kPa	63766,0	-	60530,0	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 0°C	PN-EN 14770	kPa	46376,0	-	41280,0	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 20°C	PN-EN 14770	kPa	9060,5	-	5329,0	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 40°C	PN-EN 14770	kPa	355,5	-	154,8	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 60°C	PN-EN 14770	kPa	25,6	-	10,6	-
Moduł zespolony G^* (DSR), 80°C	PN-EN 14770	kPa	3,2	-	1,4	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), -20°C	PN-EN 14770	°	0,499	-	0,6585	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 0°C	PN-EN 14770	°	2,0914	-	2,7428	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 20°C	PN-EN 14770	°	21,349	-	32,123	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 40°C	PN-EN 14770	°	56,329	-	62,85	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 60°C	PN-EN 14770	°	62,112	-	66,566	-
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 80°C	PN-EN 14770	°	71,835	-	70,87	-

(¹) – rozciągnięcie próbki w momencie zerwania

Tablica 5-7. Wyniki badań polimeroasfaltów po starzeniu RTFOT+PAV

Właściwość	Norma	Jednostka	PmB 25/55-60	PmB 45/80-55
			Wynik	Wynik
Penetracja, 5°C	PN-EN 1426 [N4]	0,1 mm	3	2
Penetracja, 15°C	PN-EN 1426	0,1 mm	9	9
Penetracja, 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	15	18
Pozostała penetracja, 25°C	PN-EN 1426	%	44	35
Temperatura mięknięcia wg PiK	PN-EN 1427 [N5]	°C	78,8	69,7
Wzrost temperatury mięknięcia po starzeniu	PN-EN 1427	°C	17,5	11,9
Temperatura łamliwości wg Fraassa	PN-EN 12593 [N32]	°C	-6	-8
Przedział plastyczności	PN-EN 14023 [N3]	°C	84,8	77,7
Indeks penetracji PI	PN-EN 12591 Załącznik A [N2]	-	1,6	0,6
Lepkość dynamiczna, 90°C	PN-EN 13302 [N6]	Pa·s	874,00	191,50
Lepkość dynamiczna, 110°C	PN-EN 13302	Pa·s	58,00	21,32
Lepkość dynamiczna, 135°C	PN-EN 13302	Pa·s	5,99	2,78
Parametr m (BBR), -6°C	PN-EN 14771 [N33]	-	0,314	0,358
Parametr m (BBR), -12°C	PN-EN 14771	-	0,263	0,294
Parametr m (BBR), -18°C	PN-EN 14771	-	0,227	0,250
Parametr m (BBR), -24°C	PN-EN 14771	-	0,182	0,195
Parametr m (BBR), -30°C	PN-EN 14771	-	0,150	0,149
Sztywność pełzania S (BBR), -6°C	PN-EN 14771	MPa	134	107
Sztywność pełzania S (BBR), -12°C	PN-EN 14771	MPa	258	219
Sztywność pełzania S (BBR), -18°C	PN-EN 14771	MPa	466	426
Sztywność pełzania S (BBR), -24°C	PN-EN 14771	MPa	755	781
Sztywność pełzania S (BBR), -30°C	PN-EN 14771	MPa	1110	1090
(DSR): min temperatura, w której $G^* \cdot \sin \delta \leq 5000 \text{ kPa}$	-	°C	35 ($G^* \cdot \sin \delta = 2792.2 \text{ kPa}$)	30 ($G^* \cdot \sin \delta = 3158.1 \text{ kPa}$)
Moduł zespolony G^* (DSR), -20°C	PN-EN 14770 [N34]	kPa	137060,0	60404,0
Moduł zespolony G^* (DSR), 0°C	PN-EN 14770	kPa	71710,0	47476,0
Moduł zespolony G^* (DSR), 20°C	PN-EN 14770	kPa	15481,7	11309,2
Moduł zespolony G^* (DSR), 40°C	PN-EN 14770	kPa	861,0	422,6

Moduł zespolony G^* (DSR), 60°C	PN-EN 14770	kPa	72,8	29,4
Moduł zespolony G^* (DSR), 80°C	PN-EN 14770	kPa	9,2	3,4
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), -20°C	PN-EN 14770	°	0,4752	0,4337
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 0°C	PN-EN 14770	°	1,6216	1,846
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 20°C	PN-EN 14770	°	13,586	19,391
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 40°C	PN-EN 14770	°	46,739	55,77
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 60°C	PN-EN 14770	°	58,118	64,221
Kąt przesunięcia fazowego δ (DSR), 80°C	PN-EN 14770	°	64,066	70,246

W tabl. 5-8 i 5-9 zestawiono obliczone wartości wyrażenia $G^*/\sin \delta$, będącego miarą odporności lepiszczy na deformację trwałą oraz wartości wyrażenia $G^*\sin \delta$, będącego miarą odporności na zmęczenie lepiszczy. Wyrażenia te obliczono na podstawie wyników badań modułu sztywności G^* oraz kąta przesunięcia fazowego δ polimeroasfaltów przeprowadzonych w reometrze dynamicznego ścinania DSR z uwzględnieniem procesów starzenia.

Tablica 5-8. Parametry obliczone na podstawie badań polimeroasfaltu PMB 25/55-60 w reometrze DSR

Temperatura [°C]	PmB 25/55-60		
	Lepiszcz nie starzone $G^*/\sin \delta$, [kPa]	Lepiszcz po RTFOT $G^*/\sin \delta$, [kPa]	Lepiszcz po RTFOT+PAV $G^*\sin \delta$, [kPa]
-20	-	-	1136,7
0	-	-	2029,3
20	10786,9	24888,2	3636,7
40	191,2	427,2	627,0
60	13,9	28,9	-
80	1,5	3,4	-
Wymaganie - temperatura, w której:	$G^*/\sin \delta \geq 1,0$	$G^*/\sin \delta \geq 2,2$	$G^*\sin \delta \leq 5000$

Tablica 5-9. Parametry obliczone na podstawie badań polimeroasfaltu PMB 45/80-55 w reometrze DSR

Temperatura [°C]	PmB 45/80-55		
	Lepiszcz nie starzone $G^*/\sin \delta$, [kPa]	Lepiszcz po RTFOT $G^*/\sin \delta$, [kPa]	Lepiszcz po RTFOT+PAV $G^*\sin \delta$, [kPa]
-20	-	-	457,2
0	-	-	1529,4
20	4339,4	10021,8	3754,8
40	89,5	174,0	349,4
60	6,5	11,6	-
80	0,95	1,5	-
Wymaganie - temperatura, w której:	$G^*/\sin \delta \geq 1,0$	$G^*/\sin \delta \geq 2,2$	$G^*\sin \delta \leq 5000$

Wyniki badań polimeroasfaltu PMB 25/55-60 zestawione w tabl. 5-8 wskazują, że lepiszcze przed starzeniem i po starzeniu RTFOT spełnia wymagania SHRP dotyczących odporności na odkształcenia (koleiny) w szerokim zakresie temperatur 20 do 80°C. Spełnienie wymagań odnośnie

parametru $G^*/\sin \delta$ w temperaturze 80°C potwierdza, że polskie polimeroasfalty mają w ostatnich latach bardzo dobre odporność na powstawanie deformacji trwałych. Badany polimeroasfalt spełnia parametr $G^*/\sin \delta$ w temperaturze o 20°C wyższej od asfaltu 50/70, również po starzeniu RTFOT.

Odporność na zmęczenie po starzeniu RTFOT+PAV w średnich temperaturach eksploatacyjnych od 0 do 20°C spełnia wymaganie SHRP. Asfalt taki nie powinien wykazywać spękań zmęczeniowych w zakresie tych temperatur.

Na podstawie wyników badań polimeroasfaltu PmB 25/55-60 można stwierdzić, że w zakresie temperatur dodatnich od 0 do 80°C asfalt wykazuje wystarczającą odporność na starzenie.

Badania sztywności pełzania S polimeroasfaltu PmB 25/55-60 w aparacie BBR w temperaturach ujemnych od 0 do -30°C wykazują, że dobrej, wysokiej odporności na koleiny polimeroasfaltów nie odpowiada wysoka odporność na spękania w ujemnych temperaturach.

Wyniki badań odporności polimeroasfaltu PmB 25/55-60 na pękanie w niskich temperaturach, określone w reometrze zginanej belki BBR, wskazują że asfalt oryginalny (przed starzeniem) i po starzeniu technologicznym RTFOT nie pęka wskutek skurczu w temperaturze -12°C. Procesy starzeniowe zachodzące podczas starzenia eksploatacyjnego RTFOT+PAV powodują, że temperatura przejścia asfaltu ze stanu lepkosprężystego w stan sprężysty, kruchy wzrasta niekorzystnie i mieści się w zakresie od -6 do -12°C.

Można stwierdzić, że polimeroasfalt PmB 25/55-60, który powinien mieć lepsze właściwości funkcjonalne niż asfalt drogowy nie modyfikowany, nie wykazuje dobrych cech technicznych w niskich temperaturach.

Wyniki badań polimeroasfaltu PmB 45/80-55 zestawione w tabl. 5-9 wskazują, że asfalt przed starzeniem i po starzeniu RTFOT spełnia wymagania SHRP dotyczących odporności na odkształcenia (koleiny) w zakresie temperatur 20 do 60°C. Spełnienie wymagań odnośnie parametru $G^*/\sin \delta$ w temperaturze 60°C jest wystarczające by w nawierzchni nie powstawały odkształcenia trwałe. Odporność na zmęczenie po starzeniu RTFOT+PAV w średnich temperaturach eksploatacyjnych od 0 do 20°C spełnia wymaganie SHRP. Asfalt taki nie powinien wykazywać spękań zmęczeniowych w zakresie tych temperatur.

Na podstawie wyników badań polimeroasfaltu PmB 45/80-55 można stwierdzić, że w zakresie temperatur dodatnich od 0 do 60°C asfalt wykazuje wystarczającą odporność na starzenie.

Badania sztywności pełzania S polimeroasfaltu PmB 25/55-60 i polimeroasfaltu PmB 45/80-55 w aparacie BBR w temperaturach ujemnych od 0 do -30°C wykazują, że dobrej, wysokiej odporności na koleiny polimeroasfaltów nie odpowiada wysoka odporność na spękania w ujemnych temperaturach.

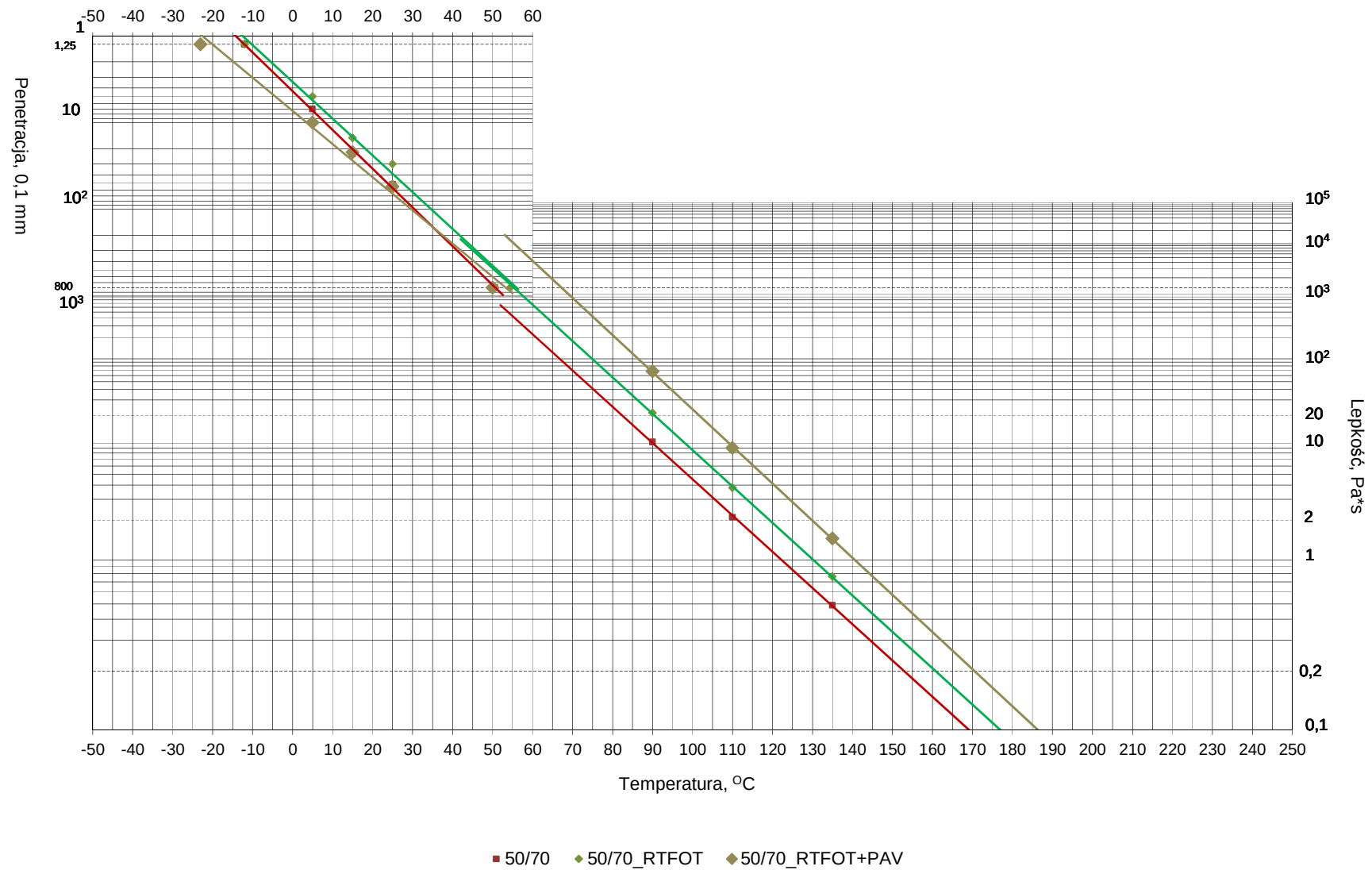
Wyniki badań odporności polimeroasfaltu PmB 45/80-55 na pękanie w niskich temperaturach, określone w reometrze zginanej belki BBR, wskazują że asfalt oryginalny (przed starzeniem) i po starzeniu technologicznym RTFOT nie pęka wskutek skurczu w temperaturze -12°C. Procesy starzeniowe zachodzące podczas starzenia eksploatacyjnego RTFOT+PAV powodują, że temperatura przejścia asfaltu ze stanu lepkosprężystego w stan sprężysty, kruchy wzrasta niekorzystnie i mieści się w zakresie od -6 do -12°C.

Można stwierdzić, że obydwa polimeroasfalty, które powinny mieć lepsze właściwości funkcjonalne niż asfalt drogowy nie modyfikowany, nie wykazują dobrych cech technicznych w niskich temperaturach.

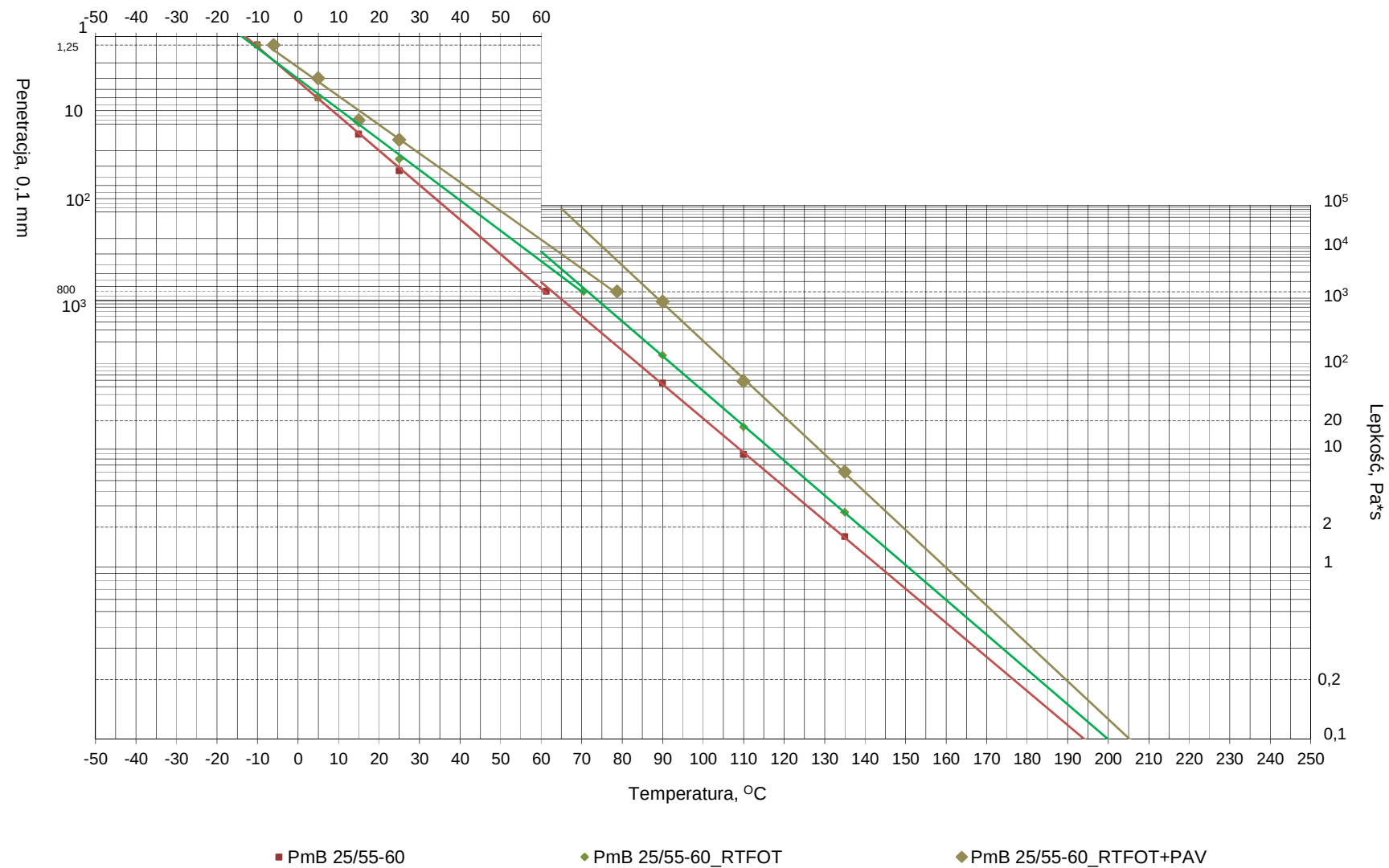
Pozostałe wyniki badań lepiszczy po starzeniu (tabl. 5-6 i 5-7), takie jak: pozostała penetracja, indeks penetracji, wzrost temperatury mięknięcia, wskazują na odporność badanych lepiszczy na procesy starzeniowe zachodzące w temperaturach technologicznych i w czasie eksploatacji nawierzchni.

Karta Jakości Asfaltów BTDC w funkcji starzenia lepiszczy

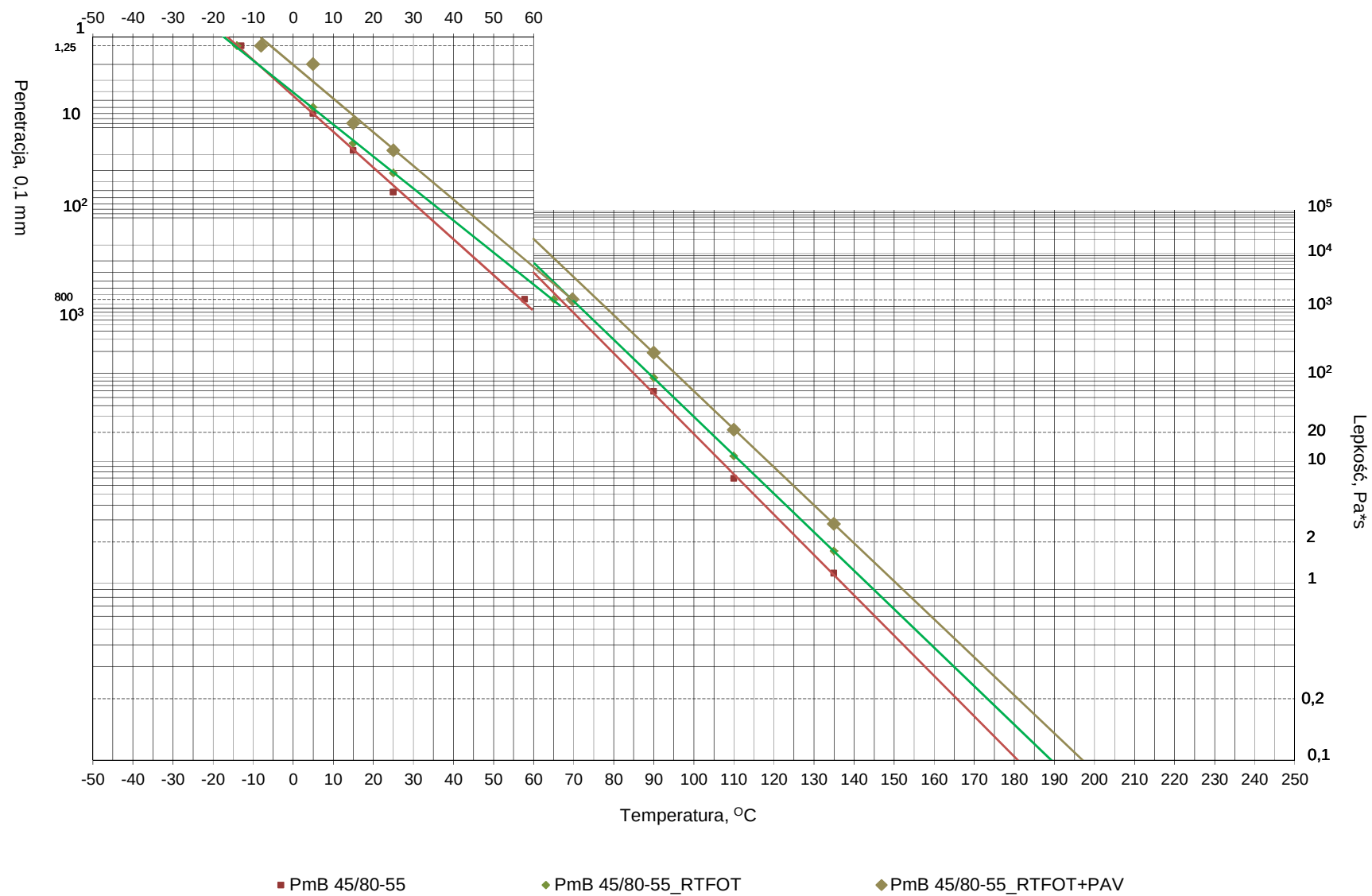
Na rys. 5-1, 5-2 i 5-3 przedstawiono wykresy Karty Jakości BTDC lepiszczy stosowanych do izolacji i warstw nawierzchni mostowych z uwzględnieniem procesów starzenia technologicznego (RTFOT) i eksploatacyjnego (RTFOT+PAV).



Rys. 5-1. Karta Jakości BTDC asfaltu drogowego 50/70 w funkcji starzenia



Rys. 5-2. Karta Jakości BTDC polimeroasfaltu PmB 25/55-60 w funkcji starzenia



Rys. 5-3. Karta Jakości BTDC polimeroasfaltu PmB 45/80-55 w funkcji starzenia

Na podstawie analizy wyników badań zestawionych w Karcie Jakości Asfaltu dla lepiszczy rodzaju 50/70 oraz polimeroasfaltów PmB 25/55-60 i PmB 45/80-55 w funkcji starzenia technologicznego i eksploatacyjnego, stwierdzono że wszystkie analizowane lepiszcza mają podobną zmianę konsystencji w temperaturach eksploatacyjnych. Należy podkreślić, że polimeroasfalty wykazują znaczne zwiększenie konsystencji w wysokich temperaturach eksploatacyjnych, które decydują o odporności na odkształcenia trwałe.

Analizując zmianę temperatur technologicznych w procesie starzenia lepiszczy można stwierdzić, że wzrost kohezji na podstawie badania lepkości jest po starzeniu technologicznym RTFOT dla asfaltu 50/70 oraz polimeroasfaltów zbliżony. Wyniki badania starzenia eksploatacyjnego RTFOT + PAV wykazują większe zmiany lepkości między lepkością asfaltu oryginalnego dla asfaltu rodzaju 50/70 niż dla polimeroasfaltów. Wskazuje to na nieznacznie mniejszą odporność na starzenie asfaltu drogowego 50/70.

5.2 Badanie odporności izolacji z papy zgrzewalnej na oddziaływanie wody, środków odladzających i starzenie

Papy termozgrzewalne stanowią obecnie najczęściej stosowane rozwiązanie materiałowo-technologiczne przy wykonywaniu zabezpieczeń przeciwwodnych obiektów mostowych. Papy termozgrzewalne stosuje się do izolacji poziomych pomostów zarówno betonowych, jak i stalowych.

Papy termozgrzewalne są układem warstwowym składającym się z osnowy przesyconej obustronnie i powleczonej polimeroasfaltem, z naniesioną na górnej powierzchni posypką mineralną. Izolację pomostu obiektu mostowego wykonuje się przez przyklejenie arkuszy papy na przygotowanym i zagruntowanym podłożu, najczęściej w jednej warstwie. Grubość papy w układzie jednowarstwowym powinna wynosić minimum 5 mm [8].

Technologia wykonania izolacji z pap termozgrzewalnych na obiektach mostowych wymaga podgrzania masy powłokowej naniesionej na dolnej powierzchni papy, w tak nieznacznym stopniu, by nastąpiło trwałe połączenie zagruntowanego podłoża z papą. Ponadto, na papę oddziałuje wysoka temperatura układanej na jej powierzchni warstwy ochronnej, najczęściej z asfaltu lanego. W wyniku oddziaływania podwyższonej temperatury technologicznej następuje intensywny proces starzenia papy, objawiający się utwardzeniem lepisczka, znaczną utratą właściwości lepkich oraz ewentualnymi zmianami właściwości osnowy. Starzenie powoduje zmianę właściwości technicznych papy, głównie giętkości, siły zrywającej i wydłużenia, możliwość powstawania spękań ułatwiających penetrację wody do płyty pomostu. Destrukcyjne oddziaływanie ruchu samochodowego i środowiska (woda, mróz) powodują obniżenie trwałości wykonanej nawierzchni mostowej.

W realizowanej pracy badaniom poddano dwa rodzaje papy zgrzewalnej przewidzianej do wykonania izolacji pomostu, wyprodukowane przez dwóch różnych producentów, oznaczonych odpowiednio numerami 1 i 2. Badania cech technicznych pap wykonano w Zakładzie Materiałów Budowlanych ITB, przez dr. Barbarę Franckę.

5.2.1 Wymagania odnośnie asfaltowych pap zgrzewalnych

W tabl. 5-10 przedstawiono łącznie wymagania, dla obydwu badanych pap zgrzewalnych wg wymagań Aprobata Technicznej Instytutu Badawczego Dróg i Mostów [39] oraz deklaracji producentów pap (wartości oznaczone *). W przypadku różnych wartości deklarowanych przez producentów podano obydwie wartości.

Tablica 5-10. Wymagania odnośnie analizowanych pap zgrzewalnych do izolacji mostowych

Właściwość	Jednostka	Wymaganie	Metoda badań
Wygląd zewnętrzny	-	Arkusz papy powinien być bez dziur, załamania i o równych krawędziach. Papa powinna mieć równomiernie rozłożoną powłokę i posypkę. Niedopuszczalne są uszkodzenia powstałe przy rozwijaniu rolki na skutek sklejenia papy.	PN-B-04615 [N44]
Długość arkusza	cm	500; 750; 1000 ($\pm 1\%$)	PN-B-04615
Szerokość arkusza	cm	100 ($\pm 1\%$) i 100 ($\pm 2\%$)*	PN-B-04615
Grubość arkusza	mm	$\geq 5,0$	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/1 [40]
Grubość warstwy izolacyjnej pod osnową	mm	$\geq 3,0$	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/2 [41]
Giętkość, badana na wałku $\varnothing 30$ mm	$^{\circ}\text{C}$	≤ -20	PN-B-04615 [N44] PN-EN 1109 [N7]
Prześlakliwość wg IBDiM	MPa	$\geq 0,5$, $\geq 0,8^*$	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/3 [42]
Siła zrywająca przy rozciąganiu ¹⁾ : - wzdłuż arkusza - w poprzek arkusza	N N	≥ 800 , $\geq 1000^*$, $\geq 1100^*$ ≥ 600 , $\geq 800^*$, $\geq 850^*$	PN-EN 12311-1 [N39]
Wydłużenie przy zerwaniu ¹⁾ : - wzdłuż arkusza - w poprzek arkusza	% %	≥ 30 , $\geq 50^*$ ≥ 30 , $\geq 50^*$, $\geq 55^*$	PN-EN 12311-1
Siła zrywająca przy rozdzielaniu ¹⁾ : - wzdłuż arkusza - w poprzek arkusza	N N	≥ 150 , $\geq 270^*$, $\geq 300^*$ ≥ 150 , $\geq 250^*$	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/4 [43]
Wytrzymałość na ścinanie styków arkuszy papy	N	≥ 500 , $\geq 700^*$	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/9 [44]
Przyczepność do podłoża metodą „pull off”	MPa	$\geq 0,5$	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/5 [45]
Odporność na działanie podwyższonej temperatury przez 2h	$^{\circ}\text{C}$	≥ 100	PN-B-04615
* wartości deklarowane przez producentów pap mostowych			
¹⁾ Oznaczenie papy wykonać w temperaturze $(20 \pm 2) ^{\circ}\text{C}$			

5.2.2 Materiały do badań

Do oceny wpływu oddziaływania procesów starzenia na izolacyjne materiały arkuszowe wybrano papę zgrzewalną powszechnie stosowaną w Polsce na obiektach mostowych a także nowy rodzaj mostowej papy izolacyjnej, wprowadzony ostatnio na polski rynek.

Wybrane do badań papy termozgrzewalne przedstawiono w tabl. 5-11.

Tablica 5-11. Materiały arkuszowe do izolacji mostowych

Rodzaj papy	Rodzaj warstw	Symbol próbki
Papa asfaltowa zgrzewalna, jednowarstwowa	Osnowa z włókniny poliestrowej obustronnie przesycona i powleczone asfaltem modyfikowanym SBS, posypka mineralna, folia antyadhezyjna	Papa mostowa nr 1
Papa asfaltowa zgrzewalna, jednowarstwowa	Osnowa z włókniny poliestrowej obustronnie przesycona i powleczone asfaltem modyfikowanym SBS, posypka mineralna, folia antyadhezyjna	Papa mostowa nr 2

5.2.3 Program badań pap zgrzewalnych

Przyjmując, że producenci deklarowali odporność pap na podwyższoną temperaturę 100°C, próbki pap poddano oddziaływaniu deklarowanej temperatury a uzyskane wyniki badań porównywano w właściwościach pap nie ogrzewanych w temperaturze 100°C. Pomost obiektu mostowego wraz z nawierzchnią narażony jest, w ciągu całego roku, na szybkie schładzanie w okresie zimowym i nagrzewanie w okresie lata. Przyjmuje się, że w okresie zimowym minimalna temperatura może wynosić - 30°C a w okresie letnim nawierzchnia może nagrzewać się do temperatury 70°C. Zakładając, że konstrukcja nawierzchni mostowej poddana jest w okresie zimowym oddziaływaniu niskich temperatur, do -30°C, przeprowadzono badania giętkości pap w temperaturach ujemnych.

Próbki pap niewygrzewanych i wygrzewanych (100°C, 2 h) poddano następującym badaniom:

- giętkości w temperaturze -10, -20 i -30°C na wałku o średnicy 30 mm, wg PN-EN 1109:2010 pkt 8.3. [N7],
- maksymalnej siły rozciągającej N/50 mm oraz wydłużenia przy maksymalnej sile (%), dla próbek wyciętych wzdłuż i w poprzek rolki wg PN-EN 12311-1:2001 [N39].

5.2.4 Wyniki badań pap zgrzewalnych

Wyniki badań pap zgrzewalnych przedstawiono w tabl. 5-12 do 5-15

Próbki laboratoryjne zostały pobrane zgodnie z normą PN-EN 13416:2004 [N45]. Nie stwierdzono wad widocznych zgodnie z normą PN-EN 1850-1:2002 [N46].

Tablica 5-12. Wyniki badań papy mostowej nr 1 niestarzanej (oryginalnej)

Lp.	Cechy badane	Wynik badania	Metodyka wg	
Próbki wyjściowe, przed działaniem podwyższonej temperatury				
1	Giętkość w temperaturze -10°C, wzdłuż	<u>powierzchnia górna</u> nie pęka; nie pęka; nie pęka; nie pęka; nie pęka	PN-EN 1109:2001, pkt.8.3 [N7]; średnica trzpienia zginającego Φ 30mm	
		pozytywny		
		<u>powierzchnia dolna</u> nie pęka; nie pęka; nie pęka; nie pęka; nie pęka		
		pozytywny		
2	Giętkość w temperaturze -20°C, wzdłuż	<u>powierzchnia górna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka	PN-EN 1109:2001, pkt 8.3 [N7]; średnica trzpienia zginającego Φ 30mm	
		negatywny		
		<u>powierzchnia dolna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka		
		negatywny		
3	Giętkość w temperaturze -30°C, wzdłuż	<u>powierzchnia górna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka	PN-EN 1109:2001, pkt 8.3 [N7]; średnica trzpienia zginającego Φ 30mm	
		negatywny		
		<u>powierzchnia dolna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka		
		negatywny		
4	Właściwości mechaniczne przy rozciąganiu: • Maksymalna siła rozciągająca, N/50mm Średnia Wynik badania • Wydłużenie przy maksymalnej sile, % Średnia	Wzdłuż	W poprzek	PN-EN 12311-1:2001[N39]; Pomiar wydłużenia: trawersa
		1328;	1013;	
		1322;	978;	
		1346;	999;	
		1246;	976;	
		1275	996;	
		1303	992	
		1305 U*)=83	990 U*)=32	
		52;	55;	
		51;	48;	
		53;	51;	
		50;	51;	
		51;	55;	
		51 U*)=2	52 U*)=7	

*) niepewność rozszerzona przy 95% poziomie ufności (k=2)

Wyniki badań giętkości próbek papy nr 1 wyjściowej (nie wygrzewanej) wskazują, że wymagania dotyczące giętkości papy są spełnione tylko w temperaturze -10°C. W temperaturze -20°C oraz -30°C pap pęka zarówno na powierzchni górnej, jak i na powierzchni dolnej. Może to wskazywać na utratę właściwości lepko-sprężystych polimeroasfaltu zawartego w masie powłokowej papy.

Badania właściwości mechanicznych papy, tj. maksymalnej siły rozciągającej, oraz wydłużenia przy maksymalnej sile, dla próbek papy pobranych wzdłuż i w poprzek arkusza charakteryzują się wysokimi wartościami, powyżej wymagań IBDiM i atestów producenta papy. Należy jednak zaznaczyć, że decydujący wpływ na wartości wymienionych parametrów mają właściwości osnowy papy. Wpływ lepischer zawartego w masie powłokowej na właściwości mechaniczne, jest bardzo ograniczony.

Tablica 5-13. Wyniki badań papy mostowej nr 1 po starzeniu

Lp.	Cechy badane	Wynik badania	Metodyka wg	
Próbki po wygrzewaniu w temperaturze +100°C w czasie 2 godzin				
1	Giętkość w temperaturze -10°C, wzdłuż	<u>powierzchnia górna</u> nie pęka; nie pęka; nie pęka; pęka; pęka	PN-EN 1109:2001, pkt 8.3 [N7]; średnica trzpienia zginającego Φ 30mm	
		negatywny		
	Wynik badania	<u>powierzchnia dolna</u> pęka; pęka; pęka; nie pęka; nie pęka		
		negatywny		
2	Giętkość w temperaturze -20°C, wzdłuż	<u>powierzchnia górna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka	PN-EN 1109:2001, pkt 8.3 [N7]; średnica trzpienia zginającego Φ 30mm	
		negatywny		
	Wynik badania	<u>powierzchnia dolna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka		
		negatywny		
3	Giętkość w temperaturze -30°C, wzdłuż	<u>powierzchnia górna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka	PN-EN 1109:2001, pkt 8.3 [N7]; średnica trzpienia zginającego Φ 30mm	
		negatywny		
	Wynik badania	<u>powierzchnia dolna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka		
		negatywny		
4	Właściwości mechaniczne przy rozciąganiu:	Wzdłuż	W poprzek	PN-EN 12311-1:2001 [N39]; Pomiar wydłużenia: trawersa
		1375;	1058;	
	1351;	1096;		
	1363;	1040;		
	1235;	1011;		
	1211	1029		
	Średnia	1307	1047	
	Wynik badania	1305 U ⁹)=160	1045 U ⁹)=65	
	• Wydłużenie przy maksymalnej sile, [%]	55;	56;	
		52;	58;	
51;		58;		
50;		50;		
Średnia	48;	55		
	51 U ⁹)=5	55 U ⁹)=8		

*) niepewność rozszerzona przy 95% poziomie ufności ($k=2$)

Wyniki badań giętkości próbek papy nr 1 wyjściowej poddanej wygrzewaniu w temperaturze 100°C w czasie 2 godzin wskazują, że gwarantowana przez producenta odporność papy na podwyższoną temperaturę nie jest zapewniona. Papa ta pęka w temperaturze -10, -20 oraz -30°C, zarówno na powierzchni górnej, jak i na powierzchni dolnej.

Badania właściwości mechanicznych papy, tj. maksymalnej siły rozciągającej, oraz wydłużenia przy maksymalnej sile, dla próbek papy pobranych wzdłuż i w poprzek arkusza charakteryzują się wysokimi wartościami, powyżej wymagań IBDiM [39] i atestów producenta papy. Należy jednak zaznaczyć, że decydujący wpływ na wartości wymienionych parametrów mają właściwości osnowy papy. Wpływ lepiszcza zawartego w masie powłokowej na właściwości mechaniczne, jest bardzo ograniczony.

Tablica 5-14. Wyniki badań papy mostowej nr 2 niestarzanej (oryginalnej)

Lp.	Cechy badane	Wynik badania	Metodyka wg
Próbki wyjściowe , przed działaniem podwyższonej temperatury			
1	Giętkość w temperaturze -10°C, wzdłuż	<u>powierzchnia górna</u> nie pęka; nie pęka; nie pęka; nie pęka; nie pęka pozytywny <u>powierzchnia dolna</u> nie pęka; nie pęka; nie pęka; nie pęka; nie pęka pozytywny	PN-EN 1109:2001, pkt.8.3 [N7]; średnica trzpienia zginającego Φ 30mm
2	Giętkość w temperaturze -20°C, wzdłuż	<u>powierzchnia górna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka negatywny <u>powierzchnia dolna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka negatywny	PN-EN 1109:2001, pkt 8.3 [N7]; średnica trzpienia zginającego Φ 30mm
3	Giętkość w temperaturze -30°C, wzdłuż	<u>powierzchnia górna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka negatywny <u>powierzchnia dolna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka negatywny	PN-EN 1109:2001, pkt 8.3 [N7]; średnica trzpienia zginającego Φ 30mm
4	Właściwości mechaniczne przy rozciąganiu: - Maksymalna siła rozciągająca, N/50mm Średnia Wynik badania - Wydłużenie przy maksymalnej sile, [%] Średnia	Wzdłuż 1229; 1314; 1114; 1114; 1164 Średnia 1187 1185 $U^*)=170$ 46; 49; 51; 49; 46; Średnia 48 $U^*)=5$ W poprzek 928; 937; 934; 1021; 1069; Średnia 978 980 $U^*)=130$ 50; 49; 49; 51; 50; Średnia 50 $U^*)=2$	PN-EN 12311-1:2001 [N39]; Pomiar wydłużenia: trawersa

*) niepewność rozszerzona przy 95% poziomie ufności ($k=2$)

Wyniki badań giętkości próbek papy nr 2 wyjściowej (nie wygrzewanej) wskazują, że wymagania dotyczące giętkości papy są spełnione tylko w temperaturze -10°C. W temperaturze -20°C oraz -30°C pap pęka zarówno na powierzchni górnej, jak i na powierzchni dolnej. Może to wskazywać na utratę właściwości lepkosprężystych polimeroasfaltu zawartego w masie powłokowej papy.

Badania właściwości mechanicznych papy, tj. maksymalnej siły rozciągającej, oraz wydłużenia przy maksymalnej sile, dla próbek papy pobranych wzdłuż i w poprzek arkusza charakteryzują się wysokimi wartościami, powyżej wymagań IBDiM i atestów producenta papy. Należy jednak zaznaczyć, że decydujący wpływ na wartości wymienionych parametrów mają właściwości osnowy papy. Wpływ lepiszcza zawartego w masie powłokowej na właściwości mechaniczne, jest bardzo ograniczony.

Tablica 5-15. Wyniki badań papy mostowej nr 2 po starzeniu

Lp.	Cechy badane	Wynik badania	Metodyka wg
Próbki po wygrzewaniu w temperaturze +100°C w czasie 2 godzin			
1	Giętkość w temperaturze -10°C, wzdłuż	<u>powierzchnia górna</u> pęka; pęka; nie pęka; nie pęka; nie pęka negatywny <u>powierzchnia dolna</u> nie pęka; nie pęka; pęka; pęka; nie pęka negatywny	PN-EN 1109:2001, pkt 8.3 [N7]; średnica trzpienia zginającego Φ 30mm
2	Giętkość w temperaturze -20°C, wzdłuż	<u>powierzchnia górna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka negatywny <u>powierzchnia dolna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka negatywny	PN-EN 1109:2001, pkt 8.3 [N7]; średnica trzpienia zginającego Φ 30mm
3	Giętkość w temperaturze -30°C, wzdłuż	<u>powierzchnia górna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka negatywny <u>powierzchnia dolna</u> pęka; pęka; pęka; pęka; pęka negatywny	PN-EN 1109:2001, pkt 8.3 [N7]; średnica trzpienia zginającego Φ 30mm
4	Właściwości mechaniczne przy rozciąganiu: - Maksymalna siła rozciągająca, N/50mm Średnia Wynik badania - Wydłużenie przy maksymalnej sile, [%] Średnia	Wzdłuż 1219; 1169; 1191; 1183; 1356 Średnia 1224 1225 $U^*)=160$ 54; 47; 51; 52; 47; Średnia 50 $U^*)=7$ W poprzek 949; 952; 999; 1030; 934 Średnia 973 975 $U^*)=81$ 45; 41; 43; 44; 40 Średnia 43 $U^*)=5$	PN-EN 12311-1:2001 [N39]; Pomiar wydłużenia: trawersa

*) niepewność rozszerzona przy 95% poziomie ufności ($k=2$)

Wyniki badań giętkości próbek papy nr 2 wyjściowej poddanej wygrzewaniu w temperaturze 100°C w czasie 2 godzin wskazują, że gwarantowana przez producenta odporność papy na podwyższoną temperaturę nie jest zapewniona. Papa ta pęka w temperaturze -10, -20 oraz -30°C, zarówno na powierzchni górnej, jak i na powierzchni dolnej.

Badania właściwości mechanicznych papy, tj. maksymalnej siły rozciągającej, oraz wydłużenia przy maksymalnej sile, dla próbek papy pobranych wzdłuż i w poprzek arkusza charakteryzują się wysokimi wartościami, powyżej wymagań IBDiM i atestów producenta papy. Należy jednak zaznaczyć, że decydujący wpływ na wartości wymienionych parametrów mają właściwości osnowy papy. Wpływ lepiszcza zawartego w masie powłokowej na właściwości mechaniczne, jest bardzo ograniczony.

Podsumowanie badania właściwości papy po oddziaływaniu podwyższonej temperatury

Należy podkreślić, że papy asfaltowe termozgrzewalne modyfikowane polimerem SBS na włókninie poliestrowej stosowane do izolacji mostów mają określone wymagania dotyczące odporności na działanie podwyższonej temperatury w ciągu 2 h. Producenci pap podają minimalną temperaturę dla pap asfaltowych termozgrzewalnych, modyfikowanych polimerem SBS wynoszącą 100°C, przy której nie powinno wystąpić uszkodzenie papy. Stosując papy termozgrzewalne z lepiszczem polimerowo-asfaltowym nie mamy wiedzy o zakresie maksymalnej, dopuszczalnej temperatury w jakiej mogą być stosowane te materiały, przy której nie następuje jeszcze zniszczenie papy. Pożądane jest, by wszyscy producenci pap termozgrzewalnych modyfikowanych polimerem SBS określali dla produkowanych wyrobów odporność na działanie wysokich, maksymalnych temperatur.

Na podstawie przedstawionych wyników badań pap zgrzewalnych nr 1 i 2, należy stwierdzić, że oceniane papy nie spełniają wymagań w zakresie giętkości w temperaturze -20°C. Papy takie mogą pękać pod wpływem obciążeń dynamicznych występujących w nawierzchniach obiektów mostowych.

5.3 Badanie odporności na starzenie izolacji z asfaltu lanego, mastyksu tradycyjnego i mastyksu ze zwiększoną zawartością frakcji grysowej

W celu określenia wpływu starzenia krótkoterminowego i długoterminowego na właściwości funkcjonalne izolacji mostowej przeprowadzono badania wybranych mieszanek mineralno-asfaltowych. Ocenie poddano izolację z asfaltu lanego (MA), mastyksu tradycyjnego oraz z mastyksu o zwiększonej zawartości frakcji grysowej (SMA/MA). Zaprojektowano mieszanki mineralno-asfaltowe do ruchu ciężkiego KR3-KR6.

5.3.1. Izolacja z asfaltu lanego (MA)

Zaprojektowano mieszankę mineralno-asfaltową typu asfalt lany (MA) o uziarnieniu 8 mm (MA 8) kategorii ruchu KR3-KR6 zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1].

Wymagania dotyczące mieszanek mineralno-asfaltowych typu asfalt lany określa norma PN-EN 13108-6 [N8], w której są podane podstawowe klasyfikacyjne wymagania. Uziarnienie mieszanek mineralnych do asfaltu lanego wg WT-2 [N1] przedstawiono w tabl. 4-43 a podstawowe wymagane właściwości w tabl. 4-44 (punkt 4.4.1.).

Materiały

Do mieszanek mineralno-asfaltowych typu asfalt lany zastosowano następujące materiały:

- wypełniacz dodany - mączka wapienna Wolica,
- piasek niełamany frakcji 0,063/2,
- piasek łamany frakcji 0/0,063 mm, z otoczków Paczków,
- grys frakcji 2/5 mm, gabro Słupiec,
- grys frakcji 5/8 mm, gabro Słupiec,
- lepiszcza:
 - PmB 25/55-60,
 - 20/30,
 - 35/50 + 2,0% (m/m) asfaltu naturalnego.

Badania materiałów kamiennych – uziarnienie

W celu ustalenia optymalnego składu mieszanki mineralnej wykonano oznaczenie składu ziarnowego materiałów kamiennych zgodnie z normą PN-EN 933-1 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania” [N10]. Poszczególne kruszywa przesiewano przez normowy zestaw sit (zestaw podstawowy +1), metodą „na sucho”. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego poszczególnych kruszyw przedstawiono w tabl. 5-16.

Tablica 5-16. Skład ziarnowy materiałów kamiennych do asfaltu lanego MA

Wymiar boku kwadratowego oczka sita [mm]	Zawartość ziaren pozostających na sicie [%]				
	Mączka wapienna Wolica	Piasek niełamany 0,063/2	Piasek łamany z otoczek Paczków 0,063/2	Grys gablo Słupiec 2/5	Grys gablo Słupiec 5/8
45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
5,6	0,0	0,0	0,0	1,1	60,7
4,0	0,0	0,0	0,2	30,9	25,2
2,0	0,0	1,5	12,9	58,6	4,3
1,0	0,0	8,0	34,6	6,2	1,0
0,5	0,0	19,1	27,7	1,1	0,2
0,25	0,0	44,0	15,8	0,4	0,2
0,125	1,0	24,1	6,2	0,3	0,2
0,063	16,1	3,0	1,6	0,3	0,1
< 0,063	82,9	0,3	1,0	1,2	0,3
Σ	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Uziarnienie wypełniacza mieści się w granicach wymagań od 70 – 100% ziaren przechodzących przez sito 0,063 mm. Piaski oraz grysy mają uziarnienia w granicach nie przekraczających wymagań wg WT-1:2010 [N11] dotyczących asfaltów lanych.

Badania materiałów kamiennych – gęstość

Oznaczenie gęstości materiałów kamiennych zostało wykonane metodą piknometryczną wg PN-EN 1097-6 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw”. Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości” [N12] i PN-EN 1097-7 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna” [N13]. Metoda polega na obliczeniu ilorazu masy ziaren i ich objętości, określonej za pomocą piknometru. Wyniki oznaczenia przedstawia tabl. 5-17.

Tablica 5-17. Gęstości kruszyw i wypełniacza

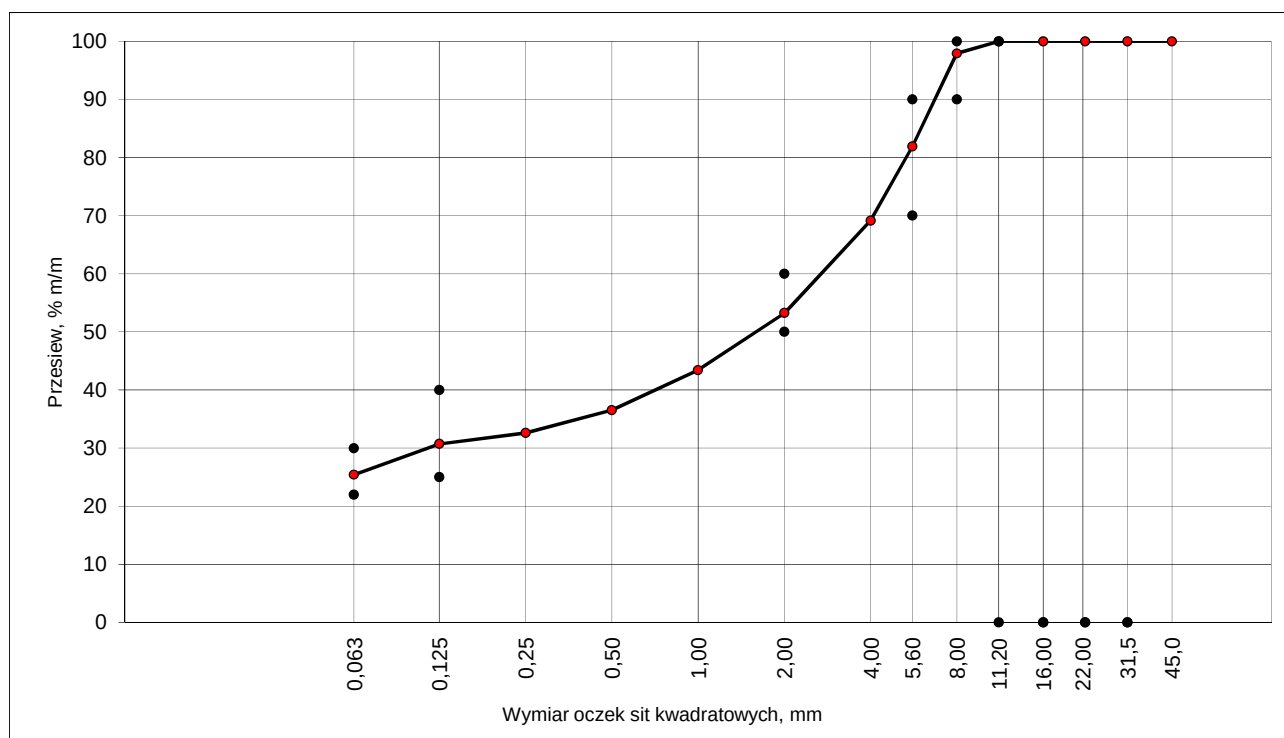
Rodzaj kruszywa	Gęstość, [g/cm ³]
Grys gablo Słupiec 5/8	2,975
Grys gablo Słupiec 2/5	2,962
Piasek łamany z otoczków Paczków	2,651
Piasek niełamany	2,654
Mączka wapienna Wolica	2,700

Gęstość kruszyw wykorzystano do ustalania współczynnika korygującego zawartość lepiszcza wg WT-2: 2010 [N1].

Ustalenie składu mieszanki mineralno-asfaltowej asfalt lany

Mieszanke mineralno-asfaltową typu asfalt lany zaprojektowano zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1]. Zaprojektowano 3 rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych typu MA 8, zróżnicowanych pod względem rodzaju lepiszcza, wykorzystując uziarnienie mieszanki mineralnej i zawartość lepiszcza dla asfaltu lanego do warstwy ścieralnej i wiążącej kategorii ruchu KR1 do KR6.

Krzywą uziarnienia zaprojektowanej mieszanki mineralnej do asfaltu lanego MA 8 przedstawiono na rys. 5-4. Ostateczny skład mieszanki mineralno-asfaltowej typu asfalt lany MA 8 przedstawiono w tabl. 5-18.



Rys. 5.4. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej do asfaltu lanego MA 8

Krzywa uziarnienia MA 8 mieści się między punktami kontrolnymi. Skład ziarnowy MA projektowano z uwzględnieniem zwiększonej odporności na odkształcenia trwałe, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej urabialności mieszanki (dodatek piasku niełamane).

Tablica 5-18. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej (mma) typu MA 8

Składniki	Skład mma typu MA 8 [%]
Lepiszczce	8,0
Mączka wapienna Wolica	27,6
Piasek niełamany	22,1
Piasek łamany z otoczków Paczków	18,4
Grys gabra Słupiec 2/5	23,9
Grys gabra Słupiec 5/8	8,0
	100,0

Do mieszanki asfaltu lanego zastosowano twarde asfalty drogowe oraz polimeroasfalt. Ze względu na urabialność mieszanki, konieczne było zwiększenie dla wszystkich rodzajów asfaltu lanego zawartości lepiszcza do 8% (m/m). Ponadto, w celu poprawy urabialności mieszanki MA 8 zastosowano piasek niełamany w ilości 22,1% (m/m).

Program badań asfaltu lanego

Mieszanki mineralno-asfaltowe stosowane do wykonywania izolacji mostowych, podczas produkcji, transportu i układania ulegają starzeniu krótkoterminowemu (technologicznemu). Dodatkowo, izolacja z mma (np. mastyks, asfalt lany) jest ponownie rozgrzewana po ułożeniu na jej powierzchni gorącej warstwy ochronnej o temperaturze 160-230°C. Oddziaływanie wysokiej temperatury powyżej może powodować zmianę właściwości lepiszczy a tym samym zmianę właściwości lepkosprężystych mieszanek

mineralno-asfaltowych. Podczas eksploatacji obiektu mostowego, mieszanki mineralno-asfaltowe do warstw izolacji podlegają procesom starzenia długoterminowego (eksploatacyjnego).

W przypadku mieszanek mineralno-asfaltowych o bardzo małej zawartości wolnej przestrzeni do warstw izolacyjnych, wpływ starzenia eksploatacyjnego jest niewielki ze względu na znacznie ograniczony dostęp powietrza. Mając to na uwadze, w przypadku mieszanki asfaltu lanego do izolacji mostowych, oceniano jedynie wpływ starzenia krótkoterminowego.

W celu określenia odporności na wysokie temperatury przy wytwarzaniu, transporcie i układaniu mieszanek mineralno-asfaltowych, luźną mieszankę asfaltu lanego (MA) poddano symulacji starzenia krótkoterminowego metodą STOA (Short Term Oven Aging) w warunkach laboratoryjnych wg Załącznika 2 do WT-2:2013 [N19]. Mieszankę wygrzewano w temperaturze 180°C w warstwie około 25-50 mm. Czas wygrzewania wynosił 3 godziny. Po procesie wygrzewania zaformowano próbki cylindryczne Marshalla Ø 100 mm zgodnie z PN-EN 12697-20 [N14]. Próbkę Marshalla po starzeniu STOA przedstawiono na rys. 5-5.

Próbki asfaltu lanego zostały wykonane z polimeroasfaltem PmB 25/55-60, asfaltem drogowym 20/30 oraz asfaltem 35/50 z 2% dodatkiem asfaltu naturalnego Trinidad.



Rys. 5-5. Próbkę asfaltu lanego MA 8 po starzeniu STOA przygotowane do badań

W celu oceny zmian właściwości asfaltu lanego pod wpływem starzenia krótkoterminowego wykonano badania modułu sztywności próbek MA nie starzonych oraz poddanych starzeniu STOA.

Szczegółowy program badań asfaltu lanego do izolacji mostowych przedstawiono poniżej:

- symulacja starzenia krótkoterminowego (STOA) luźnej mma, w warstwie 25-50 mm, w temperaturze 180°C, przez 3 godziny, wg Załącznika 2 do WT-2_2013 [N19],
- pomiar modułu sztywności w rozciąganiu pośrednim w temperaturze 10°C, metoda IT-CY wg PN-EN 12697-26 [N15].

Badanie modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej opisano szczegółowo w punkcie 4.3.1.

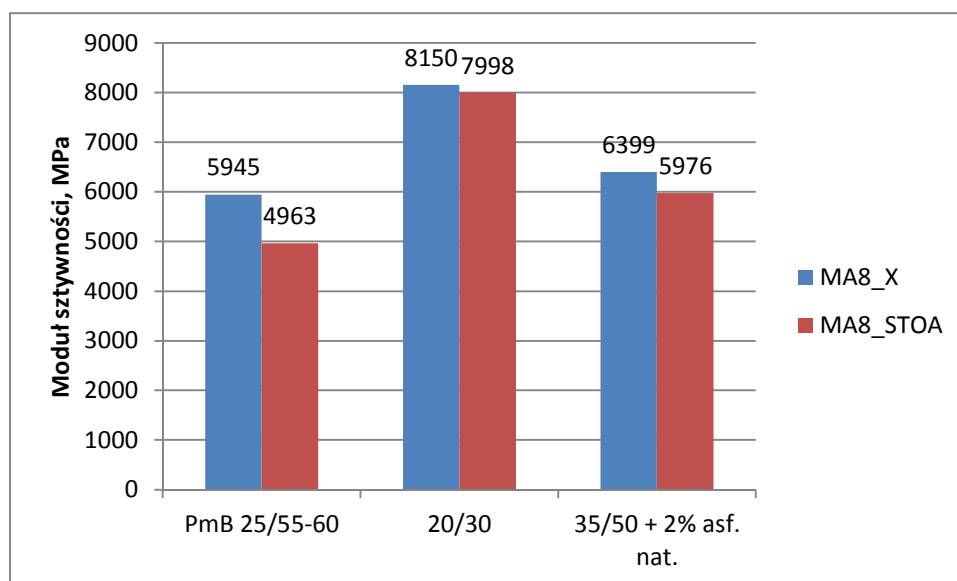
Wyniki badań asfaltu lanego

Wyniki badania zmiany modułu sztywności asfaltu lanego stosowanego do wykonywania izolacji pomostów obiektów inżynierskich niewygrzewanego (oryginalnego) oraz poddanego starzeniu krótkoterminowemu (STOA) przedstawiono w tabl. 5-19.

Na rys. 5-6 przedstawiono w formie graficznej wyniki badań modułu sztywności asfaltu lanego MA8 w funkcji starzenia krótkoterminowego.

Tablica 5-19. Wyniki badań modułu sztywności asfaltu lanego MA 8 przed i po starzeniu STOA

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Moduł sztywności w temperaturze 10°C [MPa]
PmB 25/55-60	MA8_X	-	5945
	MA8_STOA	180	4963
20/30	MA8_X	-	8150
	MA8_STOA	180	7998
35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego	MA8_X	-	6399
	MA8_STOA	180	5976



Rys. 5-6. Wyniki badań modułu sztywności asfaltu lanego MA 8 w funkcji starzenia STOA

Na podstawie analizy wyników badania zmian modułu sztywności IT-CY asfaltu lanego stosowanego do izolacji płyty pomostu obiektu inżynierskiego przedstawionych w tabl. 5-19 oraz na rys. 5-6 można stwierdzić, że moduł sztywności mieszanki asfaltu lanego MA 8 ze wszystkimi lepiszczami, w wyniku starzenia krótkoterminowego STOA obniżył się. Największą zmianą modułu sztywności charakteryzuje się asfalt lany z polimeroasfaltem PmB 25/55-60 a najmniejszą asfalt lany z asfaltem 20/30.

5.3.2. Izolacja z mastyksu (tradycyjnego)

W celu określenia wpływu starzenia krótkoterminowego (technologicznego) i długotrwałego (eksploatacyjnego) na właściwości użytkowe (funkcjonalne) izolacji mostowej wykonanej z mieszanki mineralno-asfaltowej, przeprowadzono badania mastyksu tradycyjnego o uziarnieniu do 2 mm.

Wymagania odnośnie mastyksu

Zaprojektowano mieszankę mineralno-asfaltową (mastyks) kategorii ruchu KR3-KR6 zgodnie z Katalogiem Zabezpieczeń Powierzchniowych Drogowych Obiektów Inżynierskich, opracowanym przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów [8]. Warstwa izolacji z mieszanki mineralno-asfaltowej typu mastyksowego powinna mieć grubość 10-12 mm.

Materiały

Do mieszanki mineralno-asfaltowej typu mastyks izolacyjny zastosowano następujące materiały:

- wypełniacz dodany - mączka wapienna Wolica,
- piasek łamany frakcji 0/0,063 mm, z otoczków Paczków,
- lepiszcza:
 - PmB 45/80-55,
 - 35/50,
 - 35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego.

Badania materiałów kamiennych – uziarnienie

W celu ustalenia optymalnego składu mieszanki mineralnej do mastyksu wykonano oznaczenie składu ziarnowego materiałów kamiennych. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego wypełniacza i piasku przedstawiono w tabl. 5-20.

Tablica 5-20. Uziarnienie materiałów kamiennych

Wymiar boku kwadratowego oczka sita [mm]	Zawartość ziaren pozostających na sicie [%]	
	Mączka wapienna Wolica	Piasek łamany z otoczków Paczków 0,063/2
5,6	0,0	0,0
4,0	0,0	0,2
2,0	0,0	12,9
1,0	0,0	34,6
0,5	0,0	27,7
0,25	0,0	15,8
0,125	1,0	6,2
0,063	16,1	1,6
< 0,063	82,9	1,0
Σ	100,0	100,0

Uziarnienie wypełniacza mieści się w granicach wymagań od 70 – 100% ziaren przechodzących przez sito 0,063 mm. Piaski charakteryzują się uziarnieniem w granicach nie przekraczających wymagań wg WT-1: 2010 dotyczących asfaltów lanych (brak wymagań w WT-2 odnośnie mastyksu izolacyjnego).

Badania materiałów kamiennych – gęstość

Oznaczenie gęstości materiałów kamiennych wykonano zgodnie z normą PN-EN 1097-6 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości.” [N12] i PN-EN 1097-7 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna” [N13].

Wyniki oznaczenia przedstawiono w tabl. 5-21.

Tablica 5-21. Gęstości piasku i wypełniacza

Rodzaj kruszywa	Gęstość, [g/cm ³]
Piasek łamany z otoczków Paczków	2,651
Mączka wapienna Wolica	2,700

Ustalenie składu mieszanki mineralno-asfaltowej typu mastyks izolacyjny (tradycyjny)

Mieszanke mineralno-asfaltową typu mastyksowego (mastyks izolacyjny) zaprojektowano zgodnie z wymaganiami Katalogu Zabezpieczeń Powierzchniowych Drogowych Obiektów Inżynierskich IBDiM [8]. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej przedstawiono w tabl. 5-22.

Tablica 5-22. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej typu mastyks izolacyjny (tradycyjny)

Materiały	Skład mieszanki mineralnej [%]	Skład mma typu mastyks izolacyjny [%]
Lepiszczce	0,0	13,0
Mączka wapienna Wolica	40,2	35,0
Piasek łamany z otoczków Paczków	59,8	52,0
Σ	100,0	100,0

Ze względu na poprawę odporności na deformacje trwałe mastyksu, zastosowano wyłącznie piasek łamany.

Program badań mastyksu izolacyjnego

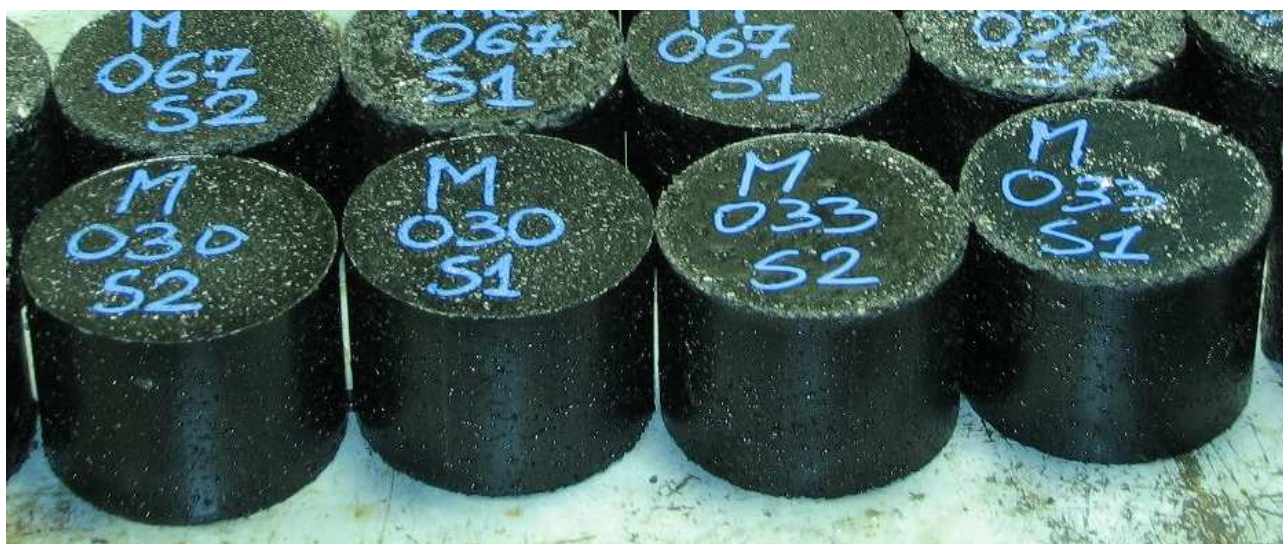
Mieszanki mineralno-asfaltowe stosowane do wykonywania izolacji mostowych, podczas produkcji, transportu i układania ulegają starzeniu krótkoterminowemu (technologicznemu). Dodatkowo, izolacja z mma (np. mastyks, asfalt lany) jest ponownie rozgrzewana po ułożeniu na jej powierzchni gorącej warstwy ochronnej o temperaturze 160-230°C. Oddziaływanie wysokiej temperatury powyżej może powodować zmianę właściwości lepkości a tym samym zmianę właściwości lepkosprężystych mieszanek mineralno-asfaltowych. Podczas eksploatacji obiektu mostowego, mieszanki mineralno-asfaltowe do warstw izolacji podlegają procesom starzenia długoterminowego (eksploatacyjnego).

W przypadku mieszanek mineralno-asfaltowych o bardzo małej zawartości wolnej przestrzeni do warstw izolacyjnych, wpływ starzenia eksploatacyjnego jest niewielki ze względu na znacznie ograniczony dostęp powietrza. Mając to na uwadze, w przypadku mieszanki mastyksu do izolacji mostowych, oceniano jedynie wpływ starzenia krótkoterminowego.

W celu określenia odporności na wysokie temperatury przy wytwarzaniu, transporcie i układaniu mieszanek mineralno-asfaltowych, luźną mieszankę mastyksu izolacyjnego poddano symulacji starzenia krótkoterminowego metodą STOA (Short Term Oven Aging) w warunkach laboratoryjnych wg Załącznika 2 do WT-2:2013 [N19]. Mieszanekę wygrzewano w temperaturze 180°C w warstwie około 25-50 mm. Czas wygrzewania wynosił 3 godziny. Po procesie wygrzewania zaformowano próbki cylindryczne Marshalla Ø 100 mm zgodnie z PN-EN 12697-20 [N14]. Próbkę Marshalla po starzeniu STOA przedstawiono na rys. 5-7.

Podobnie jak w przypadku asfaltów lanych należy zwrócić uwagę, że wysoka temperatura układania mastyksu na pomoście betonowym około 230°C może powodować emisję gazów zawartych w porach wierzchniej warstwy betonu. Rozprężanie się gazów powoduje powstawanie pęcherzy w warstwie izolacyjnej i na jej powierzchni [7].

Próbki asfaltu lanego zostały wykonane z polimeroasfaltem PmB 45/80-55, asfaltem drogowym 35/50 oraz asfaltem 35/50 z 2% dodatkiem asfaltu naturalnego Trinidad.



Rys. 5-7. Próbkę mastyksu izolacyjnego po starzeniu STOA przygotowane do badań

W celu oceny zmian właściwości asfaltu lanego pod wpływem starzenia krótkoterminowego wykonano badania modułu sztywności próbek MA nie starzonych oraz poddanych starzeniu STOA.

Szczegółowy program badań asfaltu lanego do izolacji mostowych przedstawiono poniżej:

- symulacja starzenia krótkoterminowego (STOA) luźnej mma, w warstwie 25-50 mm, w temperaturze 180°C, przez 3 godziny, wg Załącznika 2 do WT-2_2013 [N19],

- pomiar modułu sztywności w rozciąganiu pośrednim w temperaturze 10°C, metoda IT-CY wg PN-EN 12697-26 [N15].

Badanie modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej opisano szczegółowo w punkcie 4.3.1.

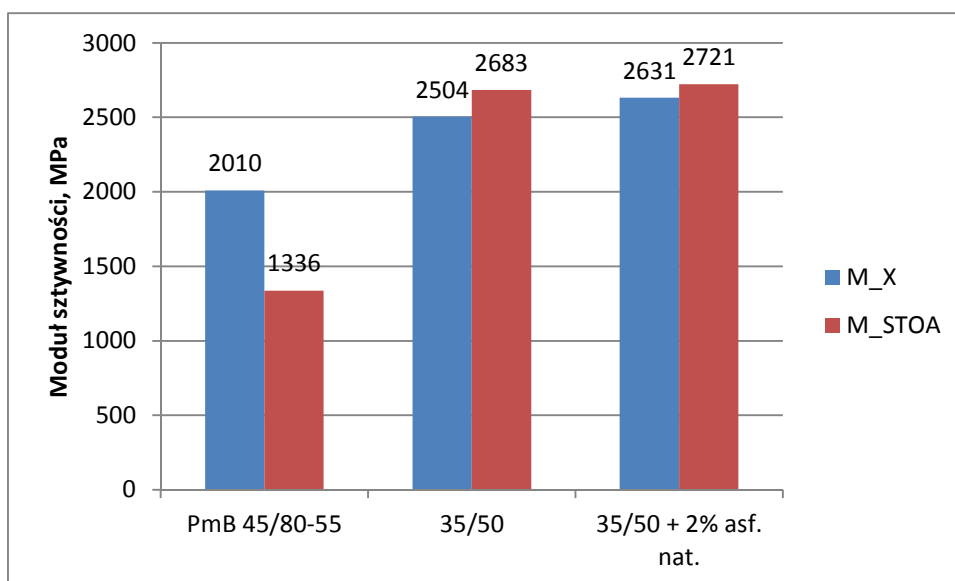
Wyniki badań mastyksu izolacyjnego

Wyniki badania zmiany modułu sztywności mastyksu stosowanego do wykonywania izolacji pomostów obiektów inżynierskich niewygrzewanego (oryginalnego) oraz poddanego starzeniu krótkoterminowemu (STOA) przedstawiono w tabl. 5-23.

Na rys. 5-8 przedstawiono w formie graficznej wyniki badań modułu sztywności mastyksu tradycyjnego w funkcji starzenia krótkoterminowego.

Tablica 5-23. Wyniki badań modułu sztywności mastyksu (tradycyjnego) przed i po starzeniu STOA

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Moduł sztywności w temperaturze 10°C [MPa]
PmB 45/80-55	M_X	-	2010
	M_STOA	180	1336
35/50	M_X	-	2504
	M_STOA	180	2683
35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego	M_X	-	2631
	M_STOA	180	2721



Rys. 5-8. Wyniki badań modułu sztywności mastyksu izolacyjnego w funkcji starzenia STOA

Na podstawie analizy wyników badania zmian modułu sztywności IT-CY mastyksu tradycyjnego stosowanego do izolacji płyty pomostu obiektu inżynierskiego przedstawionych w tabl. 5-23 oraz na rys. 5-8 można stwierdzić, że moduł sztywności mieszanki mastyksu z polimeroasfaltem PmB 45/80-55, w wyniku starzenia krótkoterminowego STOA znacznie obniżył się. Mastyks z pozostałymi lepiszczami, w wyniku starzenia charakteryzuje się niewielkim wzrostem modułu sztywności. Można stwierdzić, że mastyks z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 jest najmniej odporny na wpływ starzenia krótkoterminowego STOA.

5.3.3. Izolacja z mastyksu o zwiększonej zawartości frakcji grysowej (SMA/MA)

Mastyks wysokogrysowy (SMA/MA) jest nowym rodzajem mieszanki mineralno-asfaltowej w technologii „na gorąco” przeznaczonej przede wszystkim do izolacji pomostów obiektów inżynierskich ale również może być stosowana do warstw ochronnych izolacji. Idea mastyksu wysokogrysowego polega na połączeniu korzystnych cech mastyksu tradycyjnego, tj. szczelności, elastyczności, z korzystnymi cechami mieszanek typu SMA, z których najważniejszą jest odporność na deformacje trwałe. Mieszanki tego typu charakteryzują się nieciągłą krzywą uziarnienia oraz minimalną zawartością wolnych przestrzeni w zagęszczonej warstwie (0,3 do 0,8%).

Wymagania odnośnie mastyksu wysokogrysowego SMA/MA

Zaprojektowano mieszankę mineralno-asfaltową typu mastyks wysokogrysowy (SMA/MA) o uziarnieniu 5 i 8 mm (SMA/MA 5 i SMA/MA 8) kategorii ruchu KR3-KR6 wykorzystując wymagania odnośnie uziarnienia dla mieszanki SMA, zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1]. Wymagane uziarnienie mieszanek typu SMA przedstawiono w punkcie 4.4.2.

Projektując mieszankę mineralną typu SMA/MA z wykorzystaniem krzywych uziarnienia standardowych mieszanek typu SMA, kierowano się zasadą znacznego zwiększenia zawartości drobnych frakcji (piaskowej i wypełniaczowej) przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej zawartości frakcji grysowej powyżej 70%. Ponadto, w celu zapewnienia maksymalnej szczelności zagęszczonej mieszanki SMA/MA, zaprojektowano podwyższoną zawartość lepiscza asfaltowego do 9%. Tak duża zawartość lepiscza oraz znacznie zwiększona zawartość wypełniacza mineralnego, powodują konieczność zastosowania stabilizatora mastyksu.

Materiały

Do mieszanek mineralno-asfaltowych typu mastyks wysokogrysowy zastosowano następujące materiały:

- wypełniacz dodany - mączka wapienna Wolica,
- piasek łamany frakcji 0/0,063 mm, z otoczków Paczków,
- grys frakcji 2/5 mm, gabra Słupiec,
- grys frakcji 5/8 mm, gabra Słupiec,
- grys frakcji 8/11 mm, gabra Słupiec,
- stabilizator mastyksu – włókno celulozowe,
- lepiscza:
 - PmB 45/80-55,
 - lepiscze gumowo-asfaltowe o zawartości rozdrobnionej gumy min. 15% (m/m), uziarnieniu do 1,0 mm i penetracji około 50-70 [$\cdot$ 0,1 mm].

Badania materiałów kamiennych – uziarnienie

W celu ustalenia optymalnego składu mieszanki mineralnej wykonano oznaczenie składu ziarnowego materiałów kamiennych zgodnie z normą PN-EN 933-1 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania.” Poszczególne kruszywa przesiewano przez normowy zestaw sił (zestaw podstawowy +1), metodą „na sucho”. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego poszczególnych kruszyw przedstawiono w tabl. 5-24.

Tablica 5-24. Skład ziarnowy materiałów kamiennych do mastyksu wysokogrysowego SMA/MA

Wymiar boku kwadratowego oczka sita [mm]	Zawartość ziaren pozostających na sicie [%]				
	Mączka wapienna Wolica	Piasek niełamany 0,063/2	Piasek łamany z otoczek Paczków 0,063/2	Grys gabro Słupiec 2/5	Grys gabro Słupiec 5/8
45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
5,6	0,0	0,0	0,0	1,1	60,7
4,0	0,0	0,0	0,2	30,9	25,2
2,0	0,0	1,5	12,9	58,6	4,3
1,0	0,0	8,0	34,6	6,2	1,0
0,5	0,0	19,1	27,7	1,1	0,2
0,25	0,0	44,0	15,8	0,4	0,2
0,125	1,0	24,1	6,2	0,3	0,2
0,063	16,1	3,0	1,6	0,3	0,1
< 0,063	82,9	0,3	1,0	1,2	0,3
Σ	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Uziarnienie wypełniacza mieści się w granicach wymagań od 70 – 100% ziaren przechodzących przez sito 0,063 mm. Piaski oraz grysy mają uziarnienia w granicach nie przekraczających wymagań wg WT-1:2010 [N11] dotyczących mastyksu grysowego SMA.

Badania materiałów kamiennych – gęstość

Oznaczenie gęstości materiałów kamiennych zostało wykonane metodą piknometryczną wg PN-EN 1097-6 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw”. Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości” [N12] i PN-EN 1097-7 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna” [N13]. Metoda polega na obliczeniu ilorazu masy ziaren i ich objętości, określonej za pomocą piknometru. Wyniki oznaczenia przedstawia tabl. 5-25.

Tablica 5-25. Gęstości kruszyw i wypełniacza

Rodzaj kruszywa	Gęstość, [g/cm ³]
Grys gablo Słupiec 5/8	2,975
Grys gablo Słupiec 2/5	2,962
Piasek łamany z otoczków Paczków	2,651
Piasek niełamany	2,654
Mączka wapienna Wolica	2,700

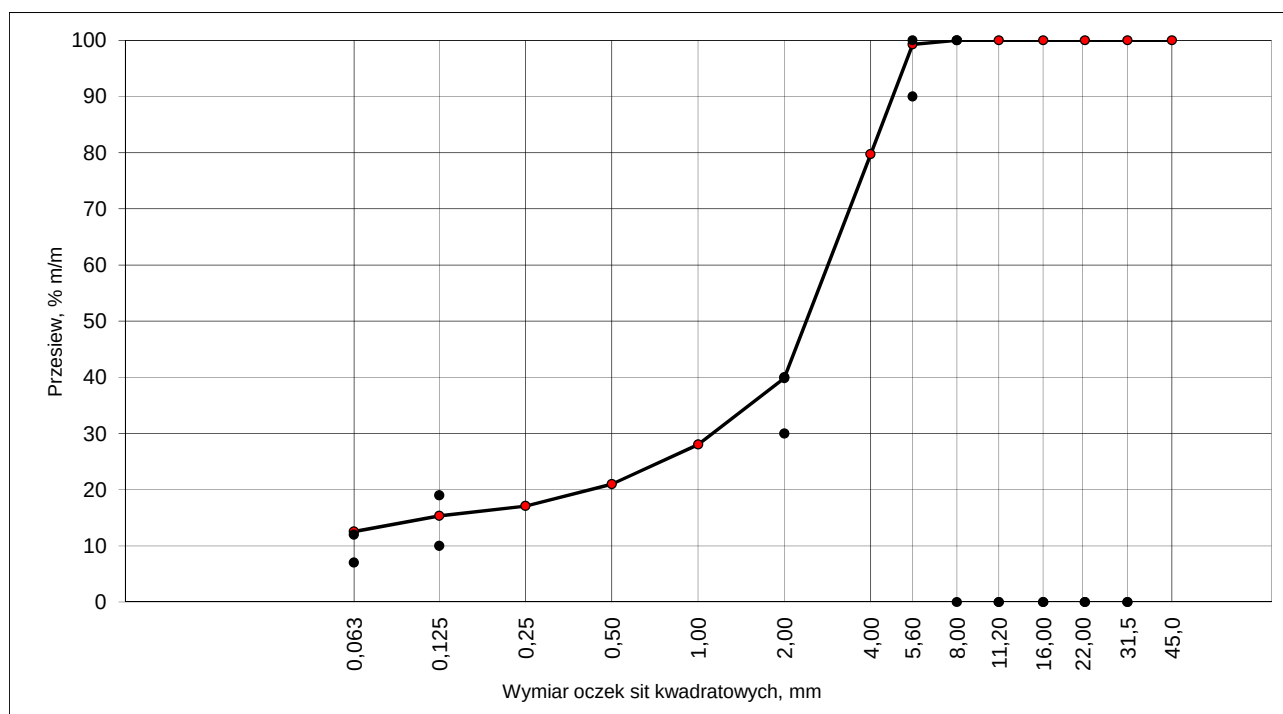
Gęstość kruszyw wykorzystano do ustalania współczynnika korygującego zawartość lepiszcza wg WT-2: 2010 [N1].

Ustalenie składu mieszanki mineralno-asfaltowej typu SMA/MA

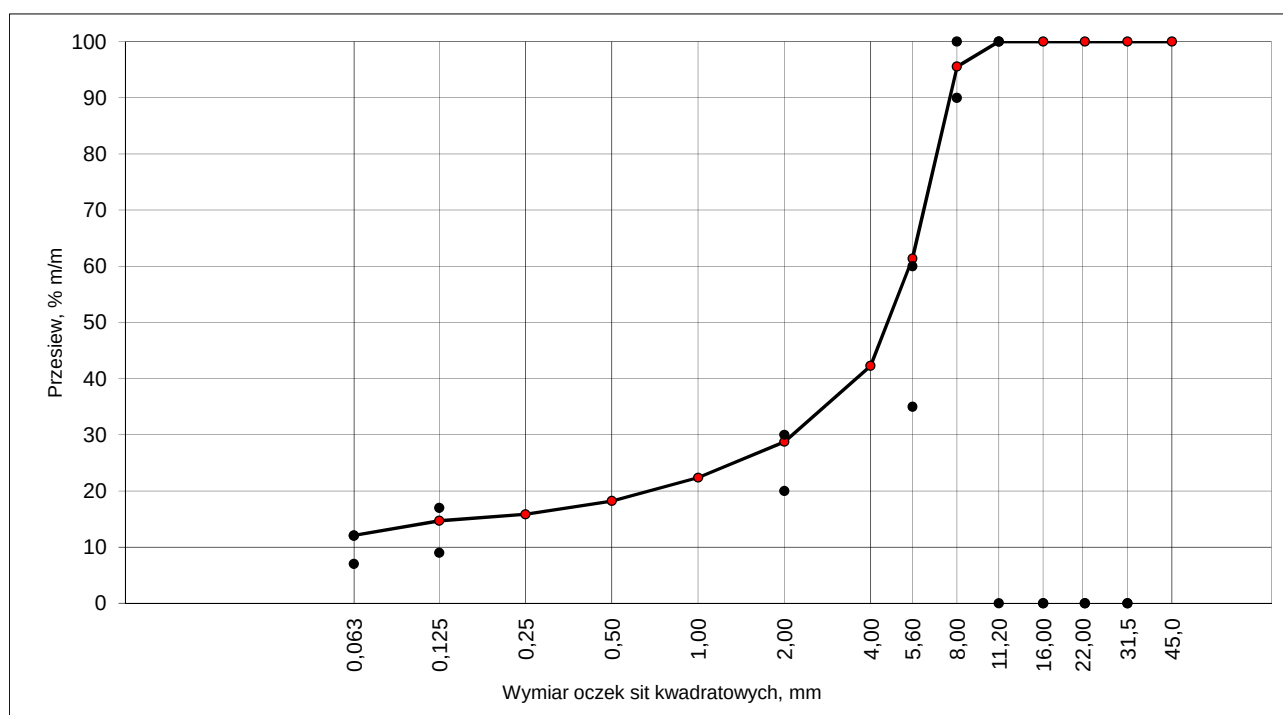
Projekt mieszanki mineralnej

Mieszanke mineralno-asfaltową typu mastyks wysokogrysowy zaprojektowano wykorzystując wymagania odnośnie uziarnienia dla mieszanki SMA, zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N11]. Zaprojektowano 4 rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych typu SMA/MA 5 i SMA/MA 8, dla kategorii ruchu KR3 do KR6, zróżnicowanych pod względem rodzaju lepiszcza.

Krzywe uziarnienia zaprojektowanych mieszanek mineralnych do mastyksu wysokogrysowego SMA/MA 5 i SMA/MA 8 przedstawiono odpowiednio na rys. 5-9 i 5-10.



Rys. 5-9. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej do mastyksu wysokogrysowego SMA/MA 5



Rys. 5-10. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej do mastyksu wysokogrysowego SMA/MA 8

Ustalenie zawartości stabilizatora mastyksu – badanie spływności

W celu obliczenia optymalnej ilości stabilizatora mastyksu przeprowadzono badanie spływności mastyksu metodą Schellenberga, zgodnie z PN-EN 12697-18 [N15]. Wyniki badań spływności przedstawiono w tabl. 4-37, w punkcie 4.3.3.

Na podstawie otrzymanych wyników badań spływności mastyksu stwierdzono, że wystarczająca zawartość stabilizatora celulozowego, wynosi 0,3%. Oznacza to, że zaprojektowana mieszanka typu

mastyks wysokogrysowy nie wymaga zwiększonej ilości stabilizatora w porównaniu do mieszanki typu SMA. Spływność mastyksu należy jednak każdorazowo sprawdzać.

Ustalenie zawartości wolnej przestrzeni w mieszankach typu SMA/MA

Podstawową cechą mastyksu wysokogrysowego jest szczelna struktura mieszanki mineralno-asfaltowej, o średniej zawartości wolnych przestrzeni w zagęszczonej próbce na poziomie około 0,5% (od 0,3 do 0,8% m/m). W celu zaprojektowania optymalnego składu SMA/MA, przeprowadzono badania gęstości mieszanki mineralno-asfaltowej SMA/MA wg PN-EN 12697-5 [N16] i gęstości objętościowej mieszanki SMA/MA wg PN-EN 12697-6 [N17]. Na podstawie uzyskanych wyników badań obliczono zawartość wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach zgodnie z PN-EN 12697-8 [N18]. Wyniki badań gęstości i gęstości objętościowej mieszanki mineralno-asfaltowej oraz obliczone zawartości wolnej przestrzeni SMA/MA 8 przedstawiono w tabl. 4-38 w punkcie 4.3.3.

Na podstawie uzyskanych wyników badań zawartości wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach SMA/MA stwierdzono, że zaprojektowany skład mieszanki mineralnej oraz przyjęta zawartość lepiszcza pozwalają na uzyskanie optymalnej zawartości wolnej przestrzeni, na poziomie około 0,7% (m/m).

Ostateczny skład mieszanek mineralno-asfaltowych

Ostateczny skład mieszanek mineralno-asfaltowych typu SMA/MA 5 i SMA/MA 8 przedstawiono w tabl. 5-26.

Tablica 5-26. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej (mma) typu SMA/MA 5 i SMA/MA 8

Składniki	Skład SMA/MA 5 [%]	Skład SMA/MA 8 [%]
Lepiszczce	9,0	9,0
Mączka wapienna Wolica	12,7	12,7
Piasek łamany z otoczków Paczków	20,9	12,7
Grys gabro Słupiec 2/5	57,3	14,6
Grys gabro Słupiec 5/8	-	51,0
	100,0	100,0

Idea projektowania izolacji z mastyksu wysokogrysowego polega na założeniu, że szkielet grysowy klinujących się ziaren, zapewni odporność na deformacje trwałe warstw SMA/MA o grubości do 2,5 cm (wyjątkowo do 4 cm), nawet przy dużej zawartości lepiszcza. Ze względu na konieczność uzyskania niskiej zawartości wolnej przestrzeni w mastyksie wysokogrysowym, na poziomie około 0,5% (m/m), przyjęto zawartość lepiszcza 9,0% (m/m).

Program badań mastyksu wysokogrysowego

Oddziaływanie wysokiej temperatury podczas procesów technologicznych może powodować zmianę właściwości lepiszczy a tym samym, zmianę właściwości lepkosprężystych mieszanek mineralno-asfaltowych. W okresie eksploatacji obiektu mostowego, mieszanki mineralno-asfaltowe do warstw izolacji podlegają procesom starzenia długoterminowego (eksploatacyjnego).

W celu określenia odporności na wysokie temperatury przy wytwarzaniu, transporcie i układaniu mieszanek mineralno-asfaltowych, luźną mieszankę mastyksu izolacyjnego poddano symulacji starzenia krótkoterminowego metodą STOA (Short Term Oven Aging) w warunkach laboratoryjnych wg Załącznika 2 do WT-2:2013 [N19]. Mieszankę wygrzewano w temperaturze 135°C przez 2 godziny a następnie w temperaturze zagęszczania przez kolejną godzinę, w warstwie około 25-50 mm. Łączny

czas wygrzewania wynosił 3 godziny. Po procesie wygrzewania zaformowano próbki cylindryczne Marshalla $\varnothing$ 100 mm, zagęszczając je w prasie żyratorowej.

Próbki mastyksu wysokogrynowego SMA/MA zostały wykonane z polimeroasfaltem PmB 45/80-55, oraz z lepiszczem gumowo-asfaltowym o zawartości rozdrobnionej gumy min. 15% (m/m), uziarnieniu do 1,0 mm i penetracji około 50-70 [$\cdot$ 0,1 mm].

W celu oceny zmian właściwości mastyksu wysokogrynowego pod wpływem starzenia krótkoterminowego (STOA) wykonano badania modułu sztywności próbek SMA/MA nie starzonych oraz poddanych starzeniu STOA.

Zaformowane próbki po starzeniu STOA poddano następnie symulacji starzenia długoterminowego LTOA (Long Term Oven Aging) w warunkach laboratoryjnych. Metodę starzenia LTOA opisano w [46]. Zagęszczone próbki mieszanki mineralno-asfaltowej wygrzewano w temperaturze 85°C w suszarce z wentylacją (z obiegiem powietrza) przez 5 dni (5 $\times$ 24 godziny).

W celu oceny zmian właściwości mastyksu wysokogrynowego pod wpływem starzenia krótkoterminowego i długoterminowego (STOA+LTOA) wykonano badania modułu sztywności próbek SMA/MA poddanych starzeniu STOA+LTOA.

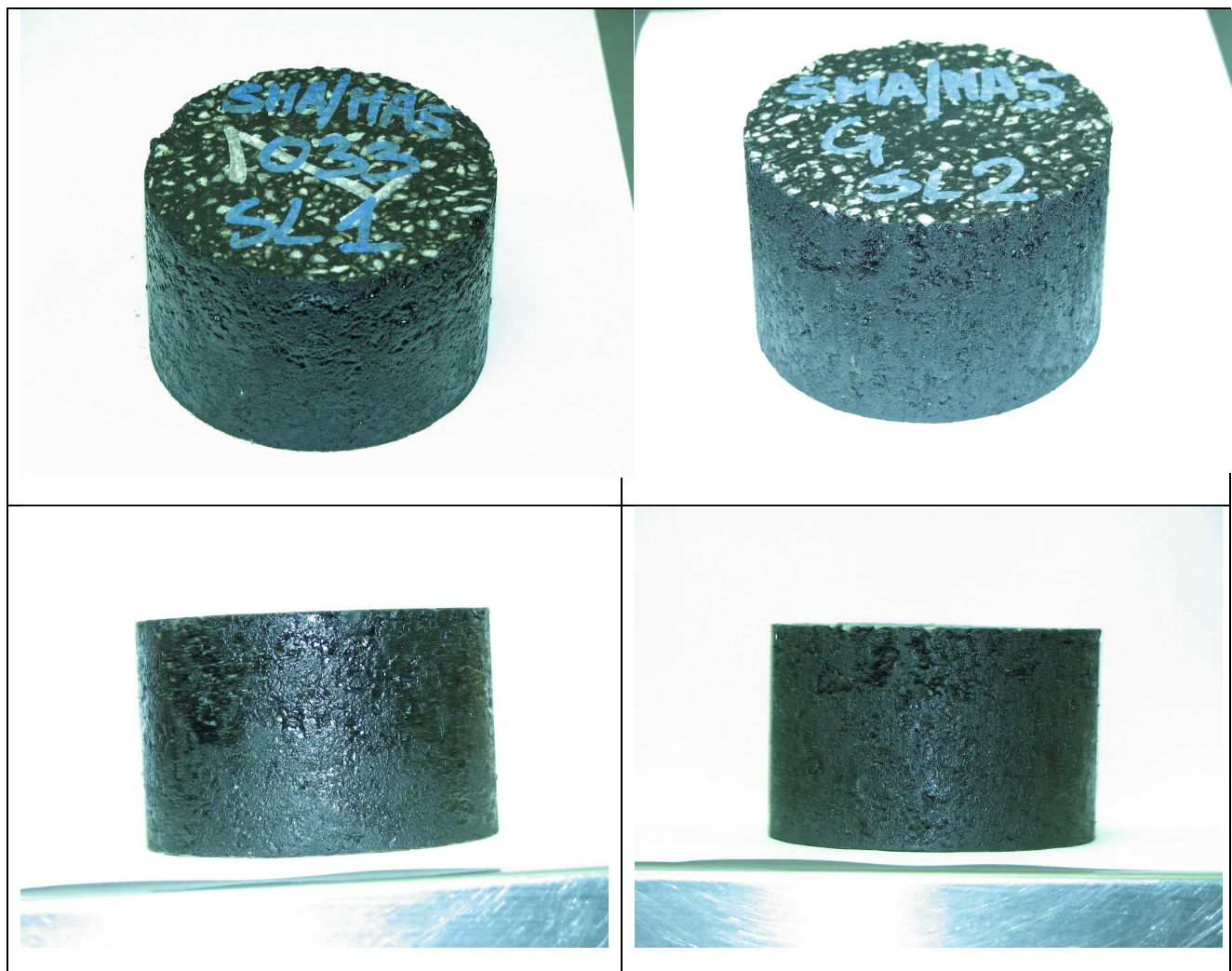
Szczegółowy program badań SMA/MA do izolacji mostowych przedstawiono poniżej:

- symulacja starzenia krótkoterminowego (STOA) luźnej mma, w warstwie 25-50 mm, w temperaturze 135°C przez 2 godziny oraz w temperaturze zagęszczania przez jedną godzinę, wg Załącznika 2 do WT-2_2013 [N19],
- symulacja starzenia długoterminowego (LTOA) zagęszczonej mma (po wcześniejszym starzeniu STOA), w temperaturze 85°C, w suszarce z obiegiem powietrza, przez 5 dni (5 $\times$ 24 godziny), wg [46],
- pomiar modułu sztywności w rozciąganiu pośrednim w temperaturze 10°C, metoda IT-CY wg PN-EN 12697-26 [N15].

Badanie modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej opisano szczegółowo w punkcie 4.3.1.

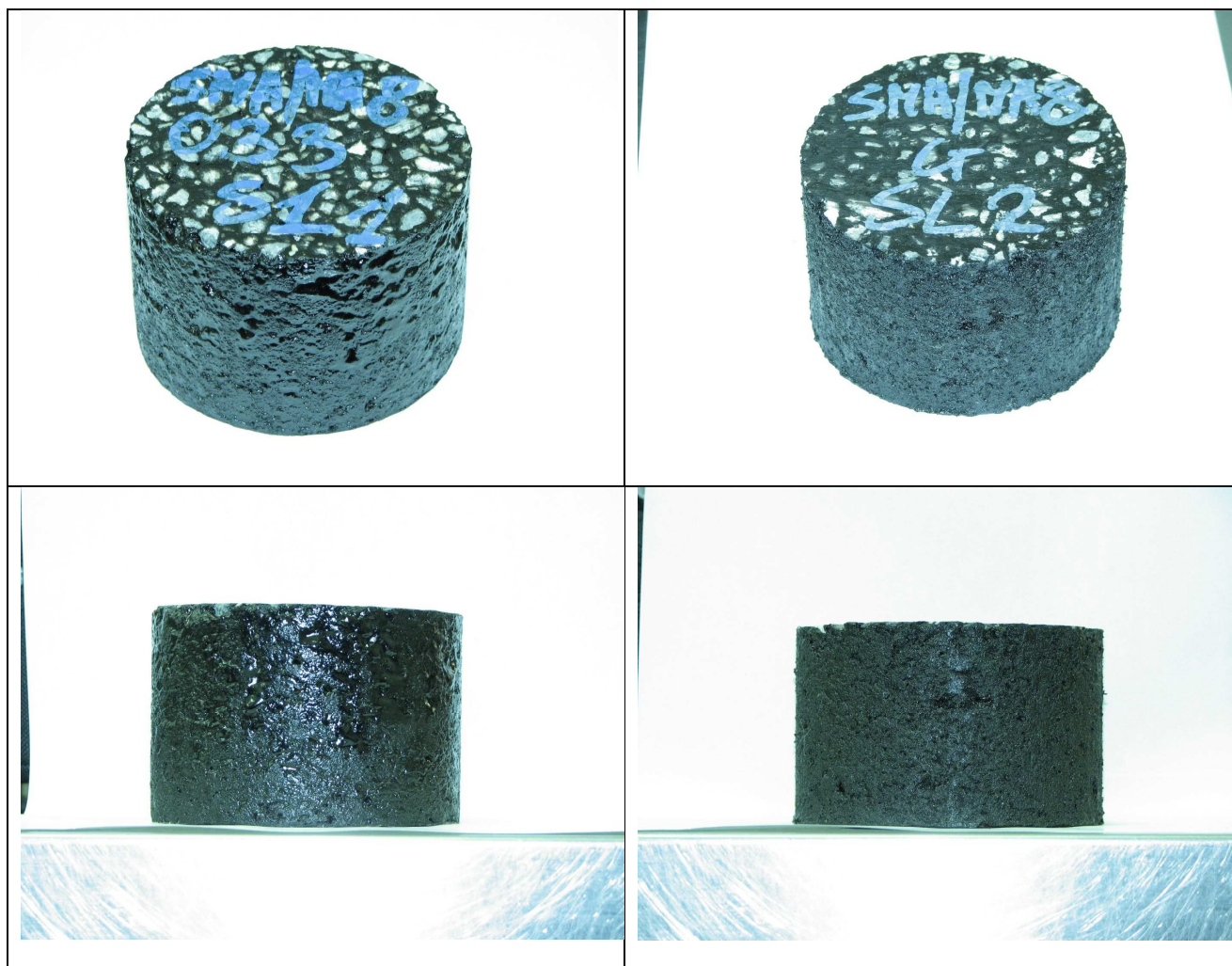
Wyniki badań wysokogryswego SMA/MA

Wygląd powierzchni próbek mastyksu wysokogryswego SMA/MA po procesie starzenia długoterminowego LTOA pokazano na rys. 5-11 do 5-14.



Rys. 5-11. Mastyks wysokogryswy SMA/MA 5 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 po starzeniu długoterminowym LTOA

Rys. 5-12. Mastyks wysokogryswy SMA/MA 5 z lepiszczem gumowo-asfaltowym po starzeniu długoterminowym LTOA



Rys. 5-13. Mastyks wysokogrysowy SMA/MA 8 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 po starzeniu długoterminowym LTOA

Rys. 5-14. Mastyks wysokogrysowy SMA/MA 8 z lepiszczem gumowo-asfaltowym po starzeniu długoterminowym LTOA

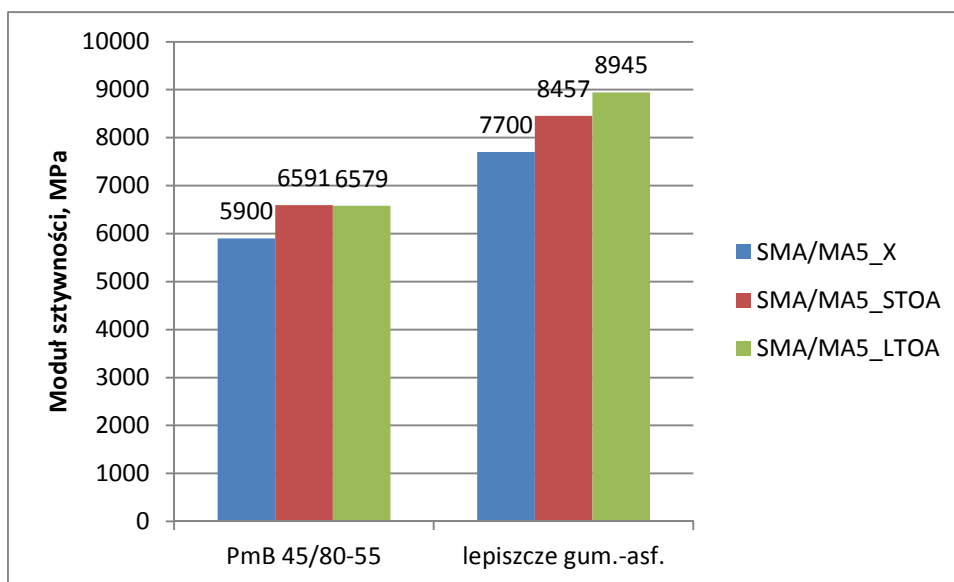
Na podstawie oceny wizualnej zmiany wyglądu próbek SMA/MA poddanych starzeniu długoterminowemu stwierdzono, że zagęszczone próbki nie uległy deformacji w wyniku wygrzewania w temperaturze 85°C przez 5 dni. Odpowiednio rozwinięty, nośny szkielet grysowy w mieszankach tego typu, zapewnia wysoką odporność na deformacje trwałe.

Wyniki badania zmiany modułu sztywności mastyksu wysokogrysowego SMA/MA stosowanego do wykonywania izolacji pomostów obiektów inżynierskich poddanego starzeniu długoterminowemu (LTOA) przedstawiono w tabl. 5-27 i 5-28.

Na rys. 5-15 i rys. 5-16 przedstawiono w formie graficznej wyniki badań modułu sztywności mieszanki SMA/MA w funkcji starzenia długoterminowego.

Tablica 5-27. Wyniki badań modułu sztywności mastyksu wysokogrysiowego SMA/MA 5 przed i po starzeniu STOA i LTOA

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Moduł sztywności w temperaturze 10°C [MPa]
PmB 45/80-55	SMA/MA5_X	-	5900
	SMA/MA5_STOA	135 i temperatura zagęszczania	6591
	SMA/MA5_LTOA	85	6579
Lepiszcz gumowo-asfaltowe	SMA/MA5_X	-	7700
	SMA/MA5_STOA	135 i temperatura zagęszczania	8457
	SMA/MA5_LTOA	85	8945



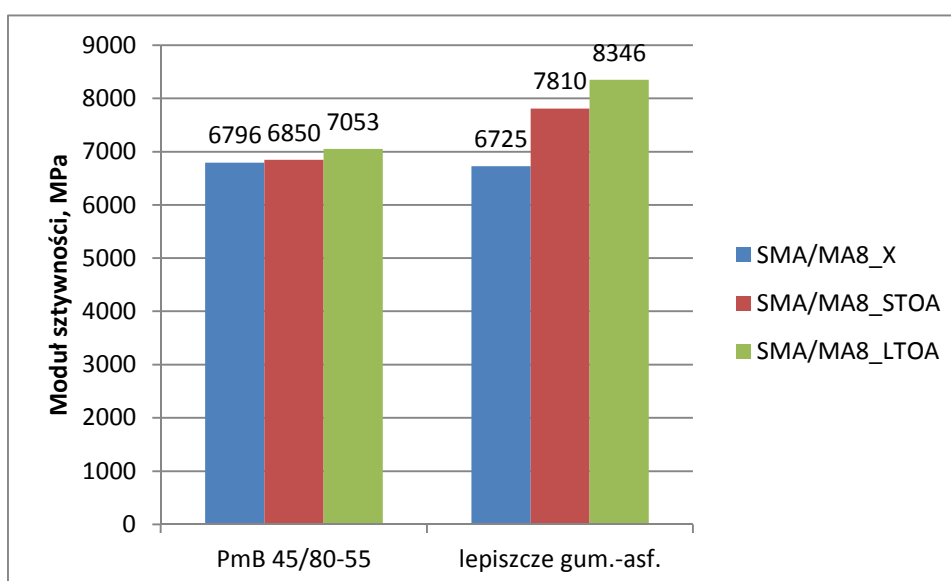
Rys. 5-15. Wyniki badań modułu sztywności mastyksu wysokogrysiowego SMA/MA 5 w funkcji starzenia STOA i LTOA

Na podstawie analizy wyników badania zmian modułu sztywności IT-CY mastyksu wysokogrysiowego SMA/MA 5 do izolacji płyty pomostu obiektu inżynierskiego przedstawionych w tabl. 5-27 i na rys. 5-15 można stwierdzić, że moduł sztywności mieszanki SMA/MA 5 ze wszystkimi lepiszczami, w wyniku starzenia krótkoterminowego STOA nieznacznie wzrasta. W wyniku starzenia długoterminowego LTOA (po wcześniejszym badaniu STOA) mastyksu wysokogrysiowego z

polimeroasfaltem, moduł sztywności nie uległ zmianie. W przypadku mastyksu wysokogrysego z lepiszczem gumowo-asfaltowym moduł sztywności po badaniu STOA nieznacznie wzrósł. Można stwierdzić, że mastyks wysokogrysego SMA/MA 5 jest odporny na starzenie krótko- i długoterminowe.

Tablica 5-28. Wyniki badań modułu sztywności mastyksu wysokogrysego SMA/MA 8 przed i po starzeniu STOA i LTOA

Rodzaj lepiscza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Moduł sztywności w temperaturze 10°C [MPa]
PmB 45/80-55	SMA/MA8_X	-	6796
	SMA/MA8_STOA	135 i temperatura zagęszczania	6850
	SMA/MA8_LTOA	85	7053
Lepiszcz gumowo-asfaltowe	SMA/MA8_X	-	6725
	SMA/MA8_STOA	135 i temperatura zagęszczania	7810
	SMA/MA8_LTOA	85	8346



Rys. 5-16. Wyniki badań modułu sztywności mastyksu wysokogrysego SMA/MA 8 w funkcji starzenia STOA i LTOA

Na podstawie analizy wyników badania zmian modułu sztywności IT-CY mastyksu wysokogrysego SMA/MA 8 do izolacji płyty pomostu obiektu inżynierskiego przedstawionych w tabl.

5-28 i na rys. 5-16 można stwierdzić, że moduł sztywności mieszanki SMA/MA 8 z obydwoma lepiszczami, w wyniku starzenia krótkoterminowego STOA i długoterminowego LTOA wzrasta. Największą zmianą modułu sztywności po starzeniu STOA charakteryzuje się mastyks wysokogrysowy z lepiszczem gumowo-asfaltowym, jednak nie są to duże różnice. Na podstawie badań modułu sztywności mastyksu wysokogrysowego można stwierdzić, że SMA/MA 8 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 jest odporny na starzenie krótko- i długoterminowe a mieszanka SMA/MA 8 z lepiszczem gumowo-asfaltowym ulega usztywnieniu w wyniku procesów starzeniowych ale zmiany te, nie powinny wpłynąć na pogorszenie właściwości funkcjonalnych izolacji z mastyksu wysokogrysowego.

5.4 Badanie odporności na starzenie, oddziaływanie wody i środków odladzających betonu asfaltowego AC, mastyksu grysowego SMA i asfaltu lanego MA do warstwy ochronnej i warstwy ścieralnej

W celu określenia wpływu starzenia krótkoterminowego i długoterminowego na właściwości funkcjonalne nawierzchni mostowej przeprowadzono badania wybranych mieszanek mineralno-asfaltowych. Ocenie poddano mieszanki mineralno-asfaltowe typu asfalt lany (MA), mastyks grysowy (SMA) oraz beton asfaltowy (AC). Zaprojektowano mieszanki mineralno-asfaltowe do ruchu ciężkiego KR3-KR6.

5.3.4. Warstwa ochronna/warstwa ścieralna z asfaltu lanego (MA)

Zaprojektowano mieszankę mineralno-asfaltową typu asfalt lany (MA) o uziarnieniu 11 mm (MA 11) kategorii ruchu KR3-KR6 zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1].

Wymagania odnośnie asfaltu lanego MA

Wymagania dotyczące mieszanek mineralno-asfaltowych typu asfalt lany określa norma PN-EN 13108-6 [N8], w której są podane podstawowe klasyfikacyjne wymagania. Uziarnienie mieszanek mineralnych do asfaltu lanego wg WT-2 [N1] przedstawiono w tabl. 4-43 a podstawowe wymagane właściwości w tabl. 4-44 (punkt 4.4.1.).

Materiały

Do mieszanek mineralno-asfaltowych typu asfalt lany zastosowano następujące materiały:

- wypełniacz dodany - mączka wapienna Wolica,
- piasek niełamany frakcji 0,063/2,
- piasek łamany frakcji 0/0,063 mm, z otoczków Paczków,
- grys frakcji 2/5 mm, gabro Słupiec,
- grys frakcji 5/8 mm, gabro Słupiec,
- grys frakcji 8/11 mm, gabro Słupiec,
- lepiszcza:
 - PmB 45/80-55
 - 35/50,
 - 35/50 + 2,0% (m/m) asfaltu naturalnego.

Badania materiałów kamiennych – uziarnienie

W celu ustalenia optymalnego składu mieszanki mineralnej wykonano oznaczenie składu ziarnowego materiałów kamiennych zgodnie z normą PN-EN 933-1 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania” [N10]. Poszczególne kruszywa przesiewano przez normowy zestaw sit (zestaw podstawowy +1), metodą „na sucho”. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego poszczególnych kruszyw przedstawiono w tabl. 5-29.

Tablica 5-29. Skład ziarnowy materiałów kamiennych do asfaltu lanego MA

Wymiar boku kwadratowego oczka sita [mm]	Zawartość ziaren pozostających na sicie [%]					
	Mączka wapienna Wolica	Piasek niełamany 0,063/2	Piasek łamany z otoczek Paczków 0,063/2	Grys gablo Słupiec 2/5	Grys gablo Słupiec 5/8	Grys gablo Słupiec 8/11
45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,1
8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	78,6
5,6	0,0	0,0	0,0	1,1	60,7	7,6
4,0	0,0	0,0	0,2	30,9	25,2	0,3
2,0	0,0	1,5	12,9	58,6	4,3	0,1
1,0	0,0	8,0	34,6	6,2	1,0	0,0
0,5	0,0	19,1	27,7	1,1	0,2	0,0
0,25	0,0	44,0	15,8	0,4	0,2	0,0
0,125	1,0	24,1	6,2	0,3	0,2	0,0
0,063	16,1	3,0	1,6	0,3	0,1	0,0
< 0,063	82,9	0,3	1,0	1,2	0,3	0,1
Σ	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Uziarnienie wypełniacza dodanego mieści się w granicach wymagań od 70 – 100% ziaren przechodzących przez sito 0,063 mm. Piaski oraz grysy mają uziarnienia w granicach nie przekraczających wymagań wg WT-1:2010 [N11] dotyczących asfaltów lanych.

Badania materiałów kamiennych – gęstość

Oznaczenie gęstości materiałów kamiennych zostało wykonane metodą piknometryczną wg PN-EN 1097-6 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości” [N12] i PN-EN 1097-7 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna” [N13]. Metoda polega na obliczeniu ilorazu masy ziaren i ich objętości, określonej za pomocą piknometru. Wyniki oznaczenia przedstawia tabl. 5-30.

Tablica 5-30 Gęstości kruszyw i wypełniacza

Rodzaj kruszywa	Gęstość, [g/cm ³]
Grys gabro Słupiec 8/11	2,991
Grys gabro Słupiec 5/8	2,975
Grys gabro Słupiec 2/5	2,962
Piasek łamany z otoczków Paczków	2,651
Piasek niełamany	2,654
Mączka wapienna Wolica	2,700

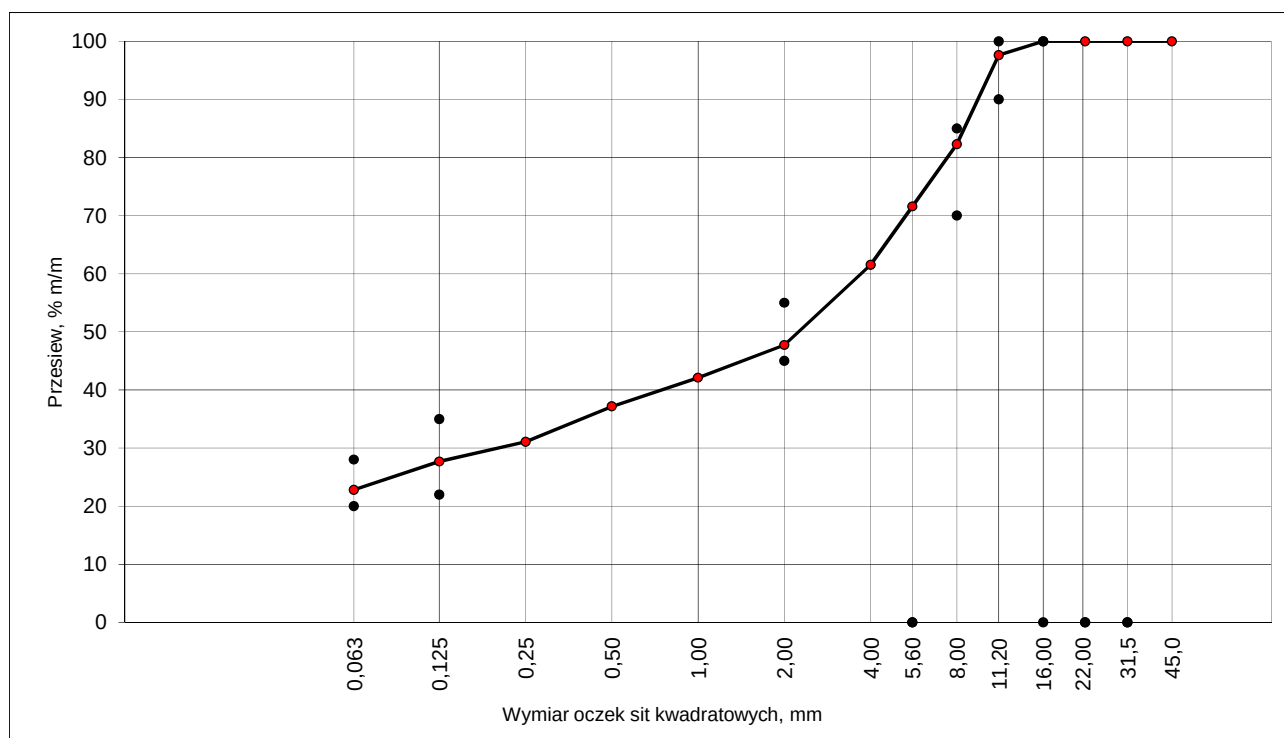
Gęstość kruszyw wykorzystano do ustalania współczynnika korygującego zawartość lepiszcza wg WT-2: 2010.

Ustalenie składu mieszanki mineralno-asfaltowej asfalt lany

Mieszanke mineralno-asfaltową typu asfalt lany zaprojektowano zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010.

Zaprojektowano 3 rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych typu MA 11, zróżnicowanych pod względem rodzaju lepiszcza, wykorzystując uziarnienie mieszanki mineralnej i zawartość lepiszcza dla asfaltu lanego do warstwy ścieralnej i wiążącej kategorii ruchu KR1 do KR6.

Krzywą uziarnienia zaprojektowanej mieszanki mineralnej do asfaltu lanego MA 11 przedstawiono odpowiednio na rys. 5-17. Ostateczny skład mieszanki mineralno-asfaltowej typu asfalt lany MA 11 przedstawiono w tabl. 5-31.



Rys. 5-17. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej do asfaltu lanego MA 11

Krzywa uziarnienia MA 11 mieści się między punktami kontrolnymi. Skład ziarnowy MA projektowano z uwzględnieniem zwiększonej odporności na odkształcenia trwałe.

Tablica 5-31. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej (mma) typu MA 11

Składniki mma	Skład mma [%]
Lepiszczce	7,5
Mączka wapienna Wolica	25,0
Piasek niełamany	9,3
Piasek łamany z otoczków Paczków	9,3
Grys gablo Słupiec 2/5	18,5
Grys gablo Słupiec 5/8	13,9
Grys gablo Słupiec 8/11	16,7
	100,0

Do mieszanek asfaltu lanego zastosowano asfalty drogowe oraz polimeroasfalt. Ze względu na urabialność mieszanki, konieczne było zwiększenie dla wszystkich rodzajów asfaltu lanego zawartości lepiszcza do 7,5 % (m/m). Ponadto, również w celu poprawy urabialności mieszanki MA 11, zastosowano piasek niełamany w ilości 9,3 % (m/m).

Program badań asfaltu lanego

Oddziaływanie wysokiej temperatury podczas procesów technologicznych może powodować zmianę właściwości lepiszczy a tym samym, zmianę właściwości lepkosprężystych mieszanek mineralno-asfaltowych. W okresie eksploatacji obiektu mostowego, mieszanki mineralno-asfaltowe do warstwy ochronnej i ścieralnej podlegają intensywnym procesom starzenia długoterminowego (eksploatacyjnego).

W celu określenia odporności na wysokie temperatury przy wytwarzaniu, transporcie i układaniu mieszanek mineralno-asfaltowych, luźną mieszankę asfaltu lanego poddano symulacji starzenia krótkoterminowego metodą STOA (Short Term Oven Aging) w warunkach laboratoryjnych wg Załącznika 2 do WT-2:2013 [N19]. Mieszankę wygrzewano w temperaturze 180°C przez 3 godziny, w warstwie około 25-50 mm. Po procesie wygrzewania zaformowano próbki sześciennie 70×70 mm oraz próbki cylindryczne Marshalla Ø 100 mm, zgodnie z PN-EN 12697-20 [N14].

Próbki asfaltu lanego MA zostały wykonane z polimeroasfaltem PmB 45/80-55, asfaltem 35/50 oraz z asfaltem 35/50 z 2% dodatkiem asfaltu naturalnego Trinidad.

W celu oceny zmian właściwości asfaltu lanego pod wpływem starzenia krótkoterminowego (STOA) wykonano badania modułu sztywności próbek MA 11 nie starzonych oraz poddanych starzeniu STOA.

Zaformowane próbki po starzeniu STOA poddano następnie symulacji starzenia długoterminowego LTOA (Long Term Oven Aging) w warunkach laboratoryjnych. Metodę starzenia LTOA opisano w [46]. Zagęszczone próbki mieszanki mineralno-asfaltowej wygrzewano w temperaturze 85°C w suszarce z wentylacją (z obiegiem powietrza) przez 5 dni (5 X 24 godziny).

W celu oceny zmian właściwości asfaltu lanego do warstw ochronnych i ścieralnych na obiektach mostowych, pod wpływem starzenia krótkoterminowego i długoterminowego (STOA+LTOA), wykonano badania modułu sztywności próbek MA poddanych starzeniu STOA+LTOA.

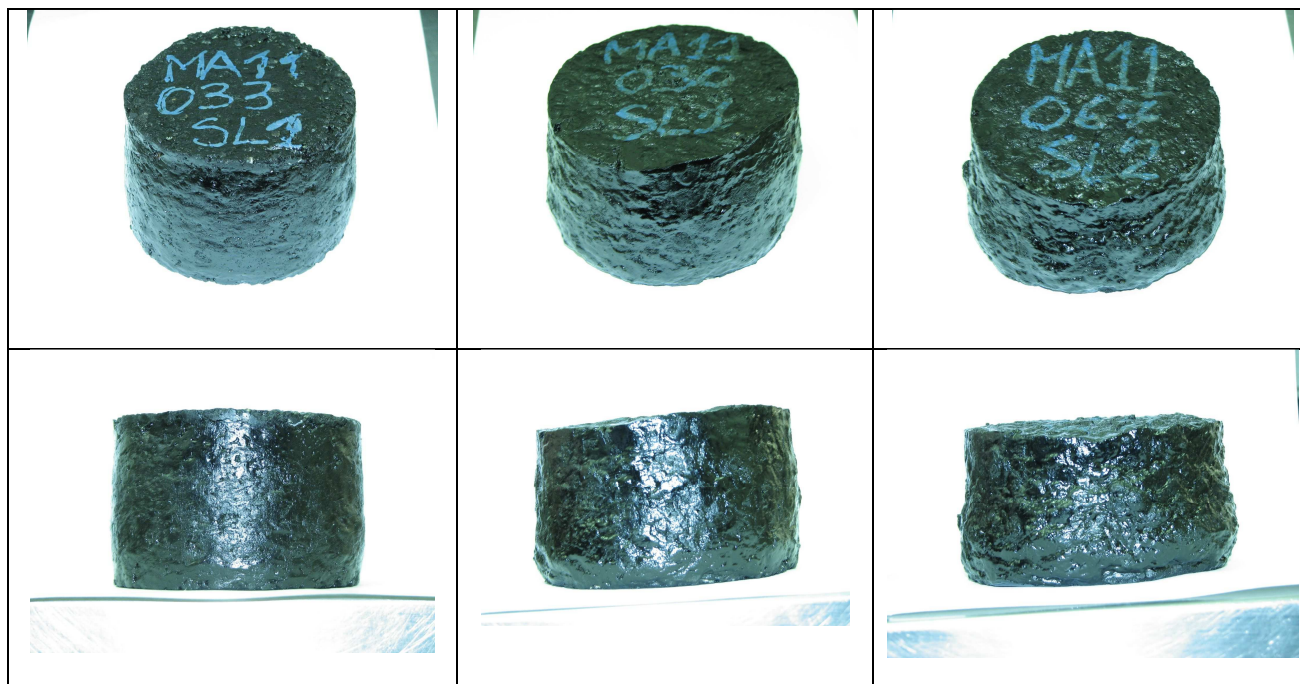
Szczegółowy program badań MA do warstw nawierzchni mostowych przedstawiono poniżej:

- symulacja starzenia krótkoterminowego (STOA) luźnej mma, w warstwie 25-50 mm, w temperaturze 180°C, przez 3 godziny, wg Załącznika 2 do WT-2_2013 [N19],
- symulacja starzenia długoterminowego (LTOA) zagęszczonej mma (po wcześniejszym starzeniu STOA), w temperaturze 85°C, w suszarce z obiegiem powietrza, przez 5 dni (5 X 24 godziny), wg [46],
- pomiar modułu sztywności w rozciąganiu pośrednim w temperaturze 10°C, metoda IT-CY wg PN-EN 12697-26 [N15].

Badanie modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej opisano szczegółowo w punkcie 4.3.1.

Wyniki badań asfaltu lanego MA

Wygląd powierzchni próbek asfaltu lanego MA po procesie starzenia długoterminowego LTOA pokazano na rys. 5-18 do 5-20.



Rys. 5-18. Asfalt lany MA 11 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 po starzeniu długoterminowym LTOA

Rys. 5-19. Asfalt lany MA 11 z asfaltem 35/50 po starzeniu długoterminowym LTOA

Rys. 5-20. Asfalt lany MA 11 z asfaltem 35/50+2,0% asfaltu naturalnego po starzeniu długoterminowym LTOA

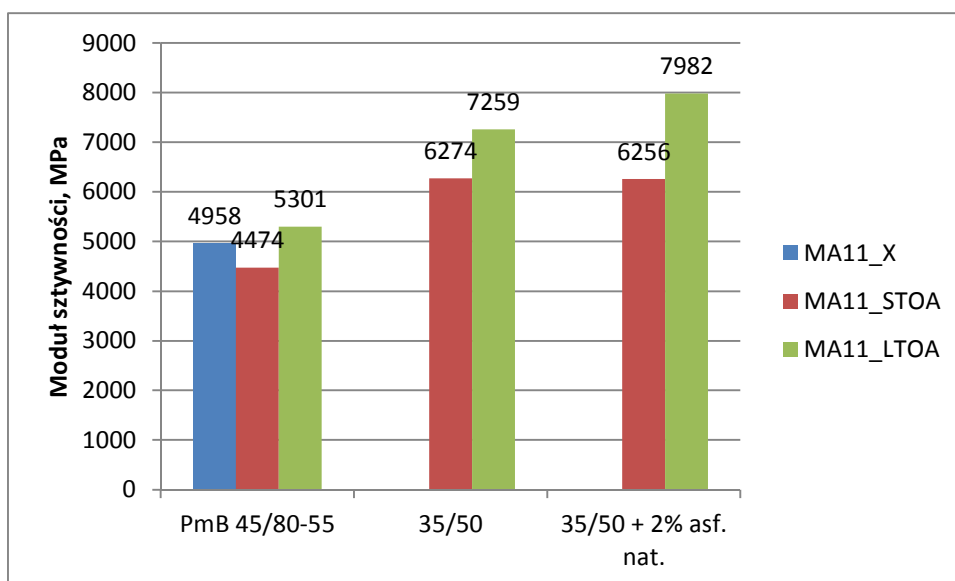
Na podstawie oceny wizualnej zmiany wyglądu próbek asfaltu lanego poddanych starzeniu długoterminowemu stwierdzono, że wszystkie zagęszczone próbki uległy deformacji w wyniku wygrzewania w temperaturze 85°C przez 5 dni. Porównując deformacje próbek MA z różnymi lepiszczami można stwierdzić, że w najmniejszym stopniu uległa deformacji mieszanka z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 a w największym stopniu, mieszanka z asfaltem 35/50+2,0% asfaltu naturalnego. Dodatek asfaltu naturalnego znacznie poprawia urabialność asfaltu lanego a jednocześnie, w mieszankach tego typu brak jest rozwiniętego nośnego szkieletu grysowego. Czynniki te mogą być powodem wystąpienia powyższego zjawiska.

Wyniki badania zmiany modułu sztywności asfaltu lanego MA 11 stosowanego do wykonywania warstw nawierzchni na pomostach obiektów inżynierskich, poddanego starzeniu długoterminowemu (LTOA) przedstawiono w tabl. 5-32.

Na rys. 5-21 przedstawiono w formie graficznej wyniki badań modułu sztywności mieszanki MA 11 w funkcji starzenia długoterminowego.

Tablica 5-32. Wyniki badań modułu sztywności asfaltu lanego MA 11 przed i po starzeniu STOA i LTOA

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Moduł sztywności w temperaturze 10°C [MPa]
PmB 45/80-55	MA11_X	-	4958
	MA11_STOA	180	4474
	MA11_LTOA	85	5301
35/50	MA11_X	-	-
	MA11_STOA	180	6274
	MA11_LTOA	85	7259
35/50 + 2,0% asfaltu naturalnego	MA11_X	-	-
	MA11_STOA	180	6256
	MA11_LTOA	85	7982



Rys. 5-21. Wyniki badań modułu sztywności asfaltu lanego MA 11 w funkcji starzenia STOA i LTOA

Na podstawie analizy wyników badania zmian modułu sztywności IT-CY asfaltu lanego MA 11 do warstw nawierzchniowych pomostu obiektu inżynierskiego przedstawionych w tabl. 5-32 i na rys. 5-21 można stwierdzić, że moduł sztywności mieszanki MA 11 z analizowanymi lepiszczami, wzrasta w wyniku starzenia długoterminowego LTOA. Największą zmianę modułu sztywności po starzeniu LTOA charakteryzuje się asfalt lany z asfaltem 35/50 i dodatkiem asfaltu naturalnego. Na podstawie badań modułu sztywności mastyksu wysokogrysowego można stwierdzić, że asfalt lany z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 charakteryzuje się najmniejszymi zmianami sztywności w wyniku starzenia krótko- i długoterminowego.

5.3.5. Warstwa ochronna/warstwa ścierna z mastyksu grysowego (SMA)

Zaprojektowano mieszankę mineralno-asfaltową typu mastyks grysowy (SMA) o uziarnieniu 8 mm (SMA8) kategorii ruchu KR3-KR6 wykorzystując wymagania odnośnie uziarnienia dla mieszanki SMA, zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1]. Projektując mieszankę mineralną typu SMA, kierowano się zasadą uzyskania jak największej szczelności mieszanki, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej zawartości frakcji grysowej powyżej 70%. W celu zapewnienia wysokiej szczelności zagęszczanej mieszanki SMA, zaprojektowano podwyższoną zawartość kruszyw drobnych.

Wymagania odnośnie mastyksu grysowego SMA

Wymagania dotyczące mieszanek mineralno-asfaltowych typu mastyks grysowy SMA określa norma PN-EN 13108-5 [N24] oraz WT-2: 2010 [N1], gdzie podane są podstawowe klasyfikacyjne wymagania. Uziarnienie mieszanek mineralnych do SMA wg WT-2 przedstawiono w tabl. 4-50 a podstawowe wymagane właściwości w tabl. 4-51 i 4-52 (punkt 4.4.2).

Materiały

Do mieszanek mineralno-asfaltowych typu mastyks grysowy zastosowano następujące materiały:

- wypełniacz dodany - mączka wapienna Wolica,
- piasek łamany frakcji 0/0,063 mm, z otoczków Paczków,
- grys frakcji 2/5 mm, gabra Słupiec,
- grys frakcji 5/8 mm, gabra Słupiec,
- stabilizator mastyksu – włókno celulozowe,
- lepiszcze:
 - PmB 45/80-55.

Badania materiałów kamiennych – uziarnienie

W celu ustalenia optymalnego składu mieszanki mineralnej wykonano oznaczenie składu ziarnowego materiałów kamiennych zgodnie z normą PN-EN 933-1 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania.” Poszczególne kruszywa przesiewano przez normowy zestaw sit (zestaw podstawowy +1), metodą „na sucho”. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego poszczególnych kruszyw przedstawiono w tabl. 5-33.

Tablica 5-33. Skład ziarnowy materiałów kamiennych do mastyksu grysowego SMA

Wymiar boku kwadratowego oczka sita [mm]	Zawartość ziaren pozostających na sicie [%]				
	Mączka wapienna Wolica	Piasek niełamany 0,063/2	Piasek łamany z otoczek Paczków 0,063/2	Grys gabro Słupiec 2/5	Grys gabro Słupiec 5/8
45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
5,6	0,0	0,0	0,0	1,1	60,7
4,0	0,0	0,0	0,2	30,9	25,2
2,0	0,0	1,5	12,9	58,6	4,3
1,0	0,0	8,0	34,6	6,2	1,0
0,5	0,0	19,1	27,7	1,1	0,2
0,25	0,0	44,0	15,8	0,4	0,2
0,125	1,0	24,1	6,2	0,3	0,2
0,063	16,1	3,0	1,6	0,3	0,1
< 0,063	82,9	0,3	1,0	1,2	0,3
Σ	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Uziarnienie wypełniacza mieści się w granicach wymagań od 70 – 100% ziaren przechodzących przez sito 0,063 mm. Piaski oraz grys mają uziarnienia w granicach nie przekraczających wymagań wg WT-1:2010 [N11] dotyczących mastyksu grysowego SMA.

Badania materiałów kamiennych – gęstość

Oznaczenie gęstości materiałów kamiennych zostało wykonane metodą piknometryczną wg PN-EN 1097-6 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw”. Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości” [N12] i PN-EN 1097-7 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna” [N13]. Metoda polega na obliczeniu ilorazu masy ziaren i ich objętości, określonej za pomocą piknometru. Wyniki oznaczenia przedstawia tabl. 5-34.

Tablica 5-34. Gęstości kruszyw i wypełniacza

Rodzaj kruszywa	Gęstość, [g/cm ³]
Grys gabro Słupiec 5/8	2,975
Grys gabro Słupiec 2/5	2,962
Piasek łamany z otoczków Paczków	2,651
Piasek niełamany	2,654
Mączka wapienna Wolica	2,700

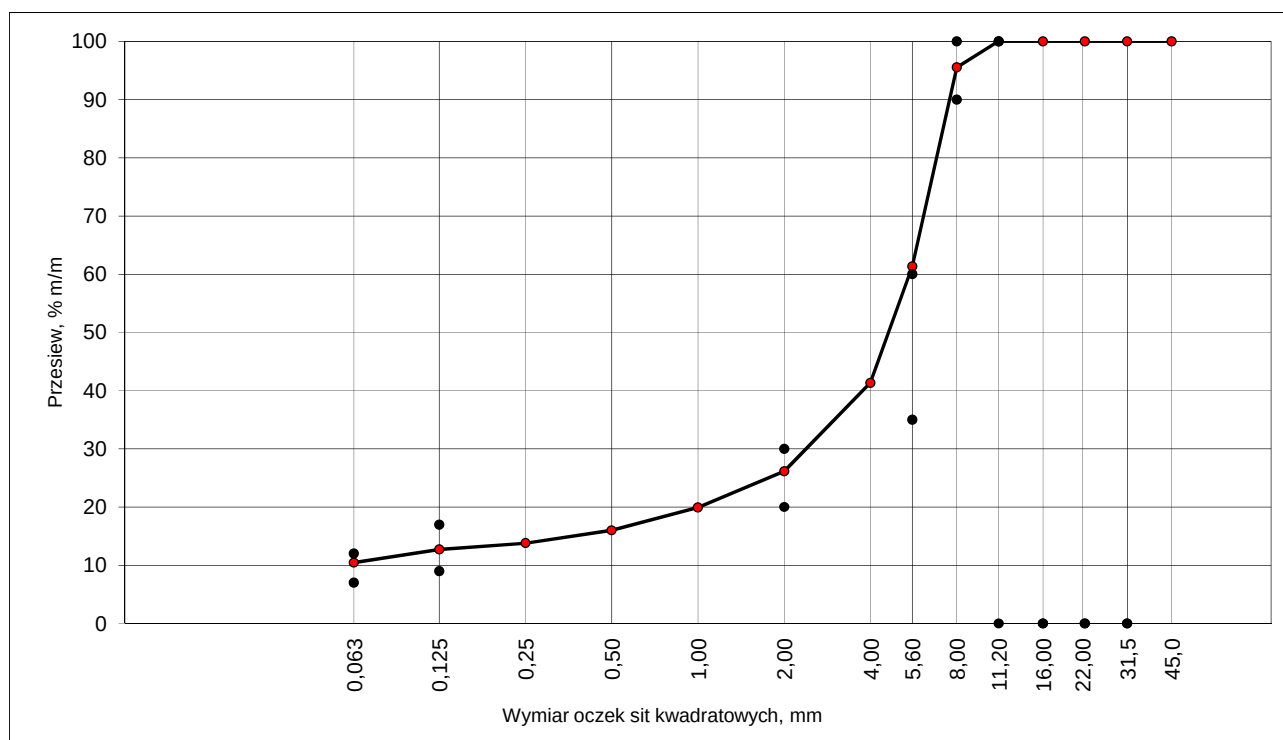
Gęstość kruszyw wykorzystano do ustalania współczynnika korygującego zawartość lepiszcza wg WT-2: 2010 [N1].

Ustalenie składu mieszanki mineralno-asfaltowej typu SMA

Projekt mieszanki mineralnej

Mieszanke mineralno-asfaltową typu mastyks grysowy SMA zaprojektowano wykorzystując wymagania zgodne z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1]. Zaprojektowano jeden rodzaj mieszanki mineralno-asfaltowej typu SMA 8, dla kategorii ruchu KR3 do KR6.

Krzywę uziarnienia zaprojektowanej mieszanki mineralnej do mastyksu grysowego SMA 8 przedstawiono na rys. 5-22.



Rys. 5-22. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej do mastyksu grysowego SMA 8

Ustalenie zawartości stabilizatora mastyksu – badanie spływności

W celu obliczenia optymalnej ilości stabilizatora mastyksu przeprowadzono badanie spływności mastyksu metodą Schellenberga, zgodnie z PN-EN 12697-18 [N15]. Wyniki badań spływności mastyksu przedstawiono w tabl. 4-55 (punkt 4.4.2). Na podstawie otrzymanych wyników badań spływności mastyksu stwierdzono, że zaprojektowany skład SMA charakteryzuje się korzystną niską spływnością. Przyjęto standardową ilość stabilizatora 0,3% (m/m).

Ustalenie zawartości wolnej przestrzeni w mieszance typu SMA

W celu zaprojektowania optymalnego składu SMA, przeprowadzono badania gęstości mieszanki mineralno-asfaltowej SMA wg PN-EN 12697-5 [N16] i gęstości objętościowej zagęszczonej mieszanki SMA wg PN-EN 12697-6 [N17]. Próbkę SMA zagęszczano po 50 uderzeń ubijaka Marshalla na każdą stronę próbki. Na podstawie uzyskanych wyników badań obliczono zawartość wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach zgodnie z PN-EN 12697-8 [N18]. Wyniki badań gęstości i gęstości objętościowej mieszanki mineralno-asfaltowej oraz obliczone zawartości wolnej przestrzeni SMA 8 przedstawiono w tabl. 4-56 (punkt 4.4.2). Na podstawie uzyskanych wyników badań zawartości wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach SMA stwierdzono, że zaprojektowany skład mieszanki mineralnej oraz przyjęta zawartość lepiszcza pozwalają na uzyskanie optymalnej zawartości wolnej przestrzeni, na poziomie około 2,6 % (m/m), co powinno zapewnić dużą szczelność warstwy ochronnej lub ścieralnej nawierzchni mostowej.

Ostateczny skład mieszanek mineralno-asfaltowych

Ostateczny skład mieszanek mineralno-asfaltowych typu SMA 8 przedstawiono w tabl. 5-35.

Tablica 5-35. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej (mma) typu SMA 8

Składniki mma	Skład mma [%]
Lepiszczce	7,0
Mączka wapienna Wolica	11,2
Piasek łamany z otoczków Paczków	12,1
Grys gabra Słupiec 2/5	17,7
Grys gabra Słupiec 5/8	52,1
	100,0

Idea projektowania nawierzchni z mastyksu grysowego polega na założeniu, że szkielet grysowy klinujących się ziaren, zapewni odporność na deformacje trwałe warstw SMA o grubości około 2,5 cm do 4,0 cm, nawet przy dużej zawartości lepiszcza. W zaprojektowanym składzie, łączna zawartość frakcji grysowej wynosi 70%. Ze względu na konieczność uzyskania szczelnej mieszanki mineralno-asfaltowej, co ma szczególne znaczenie w przypadku nawierzchni mostowych, przyjęto zawartość lepiszcza 7,0% (m/m).

Program badań mastyksu grysowego

Oddziaływanie wysokiej temperatury podczas procesów technologicznych może powodować zmianę właściwości lepiszczy a tym samym, zmianę właściwości lepkosprężystych mieszanek mineralno-asfaltowych. W okresie eksploatacji obiektu mostowego, mieszanki mineralno-asfaltowe do warstw ochronnych i ścieralnych nawierzchni mostowych podlegają procesom starzenia długoterminowego (eksploatacyjnego).

W celu określenia odporności na wysokie temperatury przy wytwarzaniu, transporcie i układaniu mieszanek mineralno-asfaltowych, luźną mieszankę mastyksu grysowego SMA poddano symulacji starzenia krótkoterminowego metodą STOA (Short Term Oven Aging) w warunkach laboratoryjnych wg Załącznika 2 do WT-2:2013 [N19]. Mieszanekę wygrzewano w temperaturze 135°C przez 2 godziny a następnie w temperaturze zagęszczania przez kolejną godzinę, w warstwie około 25-50 mm. Łączny czas wygrzewania wynosił 3 godziny. Po procesie wygrzewania zaformowano próbki cylindryczne Marshalla Ø 100 mm.

Próbki mastyksu grysowego SMA zostały wykonane z polimeroasfaltem PmB 45/80-55.

W celu oceny zmian właściwości mastyksu grysowego pod wpływem starzenia krótkoterminowego (STOA) wykonano badania modułu sztywności oraz odporności na działanie wody i mrozu próbek SMA nie starzonych oraz poddanych starzeniu STOA.

Zaformowane próbki po starzeniu STOA poddano następnie symulacji starzenia długoterminowego LTOA (Long Term Oven Aging) w warunkach laboratoryjnych. Metodę starzenia LTOA opisano w [46]. Zagęszczone próbki mieszanki mineralno-asfaltowej wygrzewano w temperaturze 85°C w suszarce z wentylacją (z obiegiem powietrza) przez 5 dni (5 X 24 godziny).

W celu oceny zmian właściwości mastyksu grysowego pod wpływem starzenia krótkoterminowego i długoterminowego (STOA+LTOA) wykonano badania modułu sztywności oraz odporności na działanie wody i mrozu próbek SMA poddanych starzeniu STOA+LTOA.

Szczegółowy program badań SMA do warstw nawierzchni mostowych przedstawiono poniżej:

- symulacja starzenia krótkoterminowego (STOA) luźnej mma, w warstwie 25-50 mm, w temperaturze 135°C przez 2 godziny oraz w temperaturze zagęszczania przez jedną godzinę, wg Załącznika 2 do WT-2_2013 [N19],
- symulacja starzenia długoterminowego (LTOA) zagęszczonej mma (po wcześniejszym starzeniu STOA), w temperaturze 85°C, w suszarce z obiegiem powietrza, przez 5 dni (5 X 24 godziny), wg [46],
- pomiar modułu sztywności w rozciąganiu pośrednim w temperaturze 10°C, metoda IT-CY wg PN-EN 12697-26 [N15],
- pomiar odporności na działanie wody i mrozu w temperaturze 25°C (wskaźnik ITSR) wg PN-EN 12697-12 [N25] i PN-EN 12697-23 [N26].

Badanie modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej opisano szczegółowo w punkcie 4.3.1. a badanie odporności na działanie wody i mrozu w punkcie 4.4.2.

Wyniki badań mastyksu grysowego SMA

Wygląd powierzchni próbek SMA po procesie starzenia długoterminowego LTOA pokazano na rys. 5-23.



Rys. 5-23. Mastyks wysokogrysowy SMA 8 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 po starzeniu długoterminowym LTOA

Na podstawie oceny wizualnej zmiany wyglądu próbek SMA poddanych starzeniu długoterminowemu stwierdzono, że zagęszczone próbki nie uległy deformacji w wyniku wygrzewania w temperaturze 85°C przez 5 dni. Odpowiednio rozwinięty, nośny szkielet grysowy w mieszankach tego typu, zapewnia wysoką odporność na deformacje trwałe.

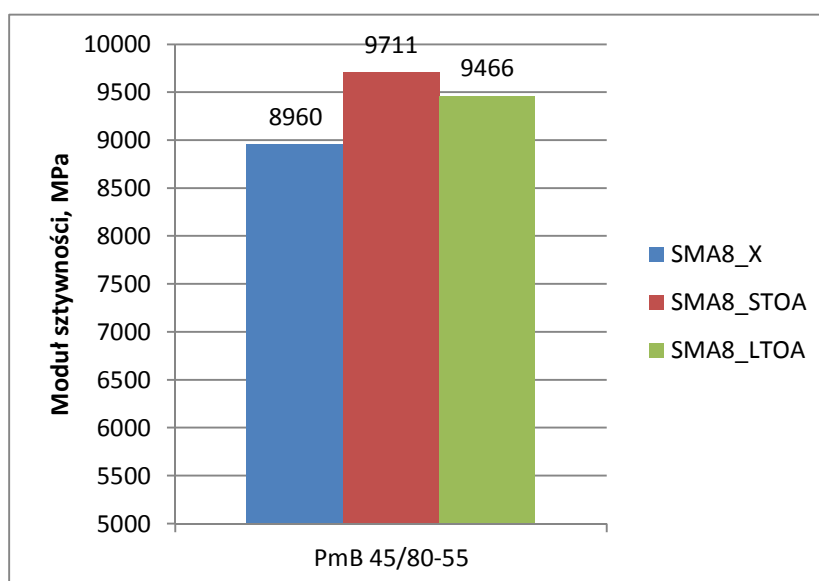
Moduł sztywności próbek SMA w funkcji starzenia

Wyniki badania zmiany modułu sztywności mastyksu grysowego SMA 8 stosowanego do wykonywania warstw nawierzchni na pomostach obiektów inżynierskich, poddanego starzeniu długoterminowemu (LTOA) przedstawiono w tabl. 5-36.

Na rys. 5-24 przedstawiono w formie graficznej wyniki badań modułu sztywności mieszanki SMA 8 w funkcji starzenia długoterminowego.

Tablica 5-36. Wyniki badań modułu sztywności mastyksu grysowego SMA 8 przed i po starzeniu STOA i LTOA

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Moduł sztywności w temperaturze 10°C [MPa]
PmB 45/80-55	SMA8_X	-	8960
	SMA8_STOA	135 i temperatura zagęszczania	9711
	SMA8_LTOA	85	9466



Rys. 5-24. Wyniki badań modułu sztywności mastyksu grysowego SMA 8 w funkcji starzenia STOA i LTOA

Na podstawie analizy wyników badania zmian modułu sztywności IT-CY mastyksu grysowego SMA 8 do warstw nawierzchniowych pomostu obiektu inżynierskiego przedstawionych w tabl. 5-36 oraz na rys. 5-24 stwierdzono, że moduł sztywności mieszanki SMA z polimeroasfalem PmB 45/80-55 nieznacznie wzrasta po starzeniu krótkoterminowym STOA i zmniejsza się w wyniku starzenia długoterminowego LTOA, co należy uznać za zjawisko korzystne. Należy wnioskować, że mastyks grysowy SMA z polimeroasfalem charakteryzuje się odpowiednią odpornością na starzenie krótko- i długoterminowego.

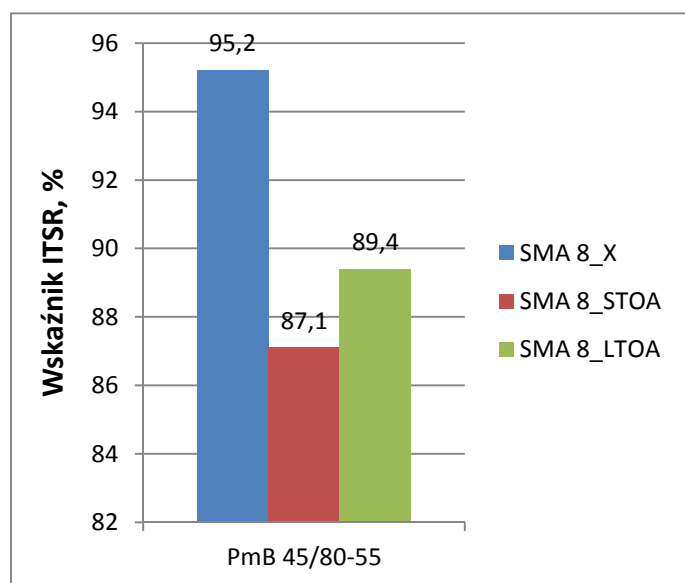
Odporność na działanie wody i mrozu próbek SMA w funkcji starzenia

W tabl. 5-37 i na rys. 5-25 przedstawiono wyniki badania wskaźnika ITSR odporności na działanie wody i mrozu mastyksu grysowego SMA 8 w funkcji starzenia długoterminowego LTOA. Wskaźnik ITSR obliczono na podstawie badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek poddanych kondycjonowaniu w wodzie ITS_w oraz próbek suchych ITS_d .

Tablica 5-37. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie pośrednie mastyksu grysowego SMA 8 przed i po starzeniu STOA i LTOA

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	ITS_w [MPa]	ITS_d [MPa]	Wskaźnik ITSR* [%]
PmB 45/80-55	SMA8_X	-	0,89	9,40	95,2
	SMA8_STOA	135 i temperatura zagęszczania	1,04	1,19	87,1
	SMA8_LTOA	85	1,08	1,21	89,4

* próbki zagęszczane po 35 uderzeń ubijaka na każdą stronę



Rys. 5-25. Wskaźnik ITSR mastyksu grysowego SMA 8 w funkcji starzenia STOA i LTOA

Miarodajną ocenę odporności zagęszczonej mieszanki mineralno-asfaltowej na działanie wody z jednym cyklem zamrażania, jest badanie odporności na działanie wody wg PN-EN 12697-12 [N25]. Na podstawie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie zestawu „mokrego” próbek i zestawu „suchego” obliczono wskaźnik ITSR, którego sposób obliczania przedstawiono w punkcie 4.4.2.

Na podstawie analizy wyników badania wskaźnika ITSR mastyksu grysowego SMA 8 stosowanego do warstw nawierzchni na obiekcie inżynierskim, przedstawionych w tabl. 5-37 oraz na rys. 5-25 można stwierdzić, że:

- mieszanka wyjściowa SMA 8 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 charakteryzuje się wysoką wartością wskaźnika, powyżej 90% i spełnia wymagania WT-2: 2010;

- w wyniku starzenia krótkoterminowego STOA mieszanki SMA 8 z polimeroasfaltem następuje znaczne obniżenie wskaźnika ITSR (o około 8%);
- starzenie długoterminowe wpływa na wzrost wskaźnika ITSR mieszanki SMA 8 z polimeroasfaltem, który jest zbliżony do wymaganego wg WT-2 poziomu 90%.

Należy zauważyć, że wg nowego projektu Wymagań Technicznych WT-2 z 2013 roku minimalna wartość wskaźnika ITSR mieszanek typu SMA, kategorii ruchu KR5-KR7 została obniżona do 85%.

5.3.6. Warstwa ochronna/warstwa ścieralna z betonu asfaltowego (AC)

Zaprojektowano mieszankę mineralno-asfaltową typu beton asfaltowy (AC) o uziarnieniu 11 mm (AC 11) kategorii ruchu KR5-KR6 zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1]. Projektując mieszankę mineralną typu AC, kierowano się zasadą uzyskania jak największej szczelności mieszanki, przy jednoczesnym zachowaniu zawartości frakcji grysowej powyżej 55%.

Wymagania odnośnie mastyksu grysowego AC

Wymagania dotyczące mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy AC określa norma PN-EN 13108-1 [N28] oraz WT-2: 2010 [N1], gdzie podane są podstawowe klasyfikacyjne wymagania. Uziarnienie mieszanek mineralnych do AC wg WT-2 [N1] przedstawiono w tabl. 4-60 a podstawowe wymagane właściwości w tabl. 4-61 i 4-62 (punkt 4.4.3).

Materiały

Do mieszanek mineralno-asfaltowych typu mastyks grysowy zastosowano następujące materiały:

- wypełniacz dodany - mączka wapienna Wolica,
- piasek łamany frakcji 0/0,063 mm, z otoczków Paczków,
- grys frakcji 2/5 mm, gabro Słupiec,
- grys frakcji 5/8 mm, gabro Słupiec,
- grys frakcji 8/11 mm, gabro Słupiec
- lepiszcza:
 - PmB 45/80-55 (do warstwy ścieralnej),
 - PmB 25/55-60 (do warstwy ochronnej).

Badania materiałów kamiennych – uziarnienie

W celu ustalenia optymalnego składu mieszanki mineralnej wykonano oznaczenie składu ziarnowego materiałów kamiennych zgodnie z normą PN-EN 933-1 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania.” Poszczególne kruszywa przesiewano przez normowy zestaw sit (zestaw podstawowy +1), metodą „na sucho”. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego poszczególnych kruszyw przedstawiono w tabl. 5-38.

Tablica 5-38. Skład ziarnowy materiałów kamiennych do betonu asfaltowego AC

Wymiar boku kwadratowego oczka sita [mm]	Zawartość ziaren pozostających na sicie [%]					
	Mączka wapienna Wolica	Piasek niełamany 0,063/2	Piasek łamany z otoczek Paczków 0,063/2	Grys gabro Słupiec 2/5	Grys gabro Słupiec 5/8	Grys gabro Słupiec 8/11
45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,1
8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	78,6
5,6	0,0	0,0	0,0	1,1	60,7	7,6
4,0	0,0	0,0	0,2	30,9	25,2	0,3
2,0	0,0	1,5	12,9	58,6	4,3	0,1
1,0	0,0	8,0	34,6	6,2	1,0	0,0
0,5	0,0	19,1	27,7	1,1	0,2	0,0
0,25	0,0	44,0	15,8	0,4	0,2	0,0
0,125	1,0	24,1	6,2	0,3	0,2	0,0
0,063	16,1	3,0	1,6	0,3	0,1	0,0
< 0,063	82,9	0,3	1,0	1,2	0,3	0,1
Σ	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Uziarnienie wypełniacza dodanego mieści się w granicach wymagań od 70 – 100% ziaren przechodzących przez sito 0,063 mm. Piaski oraz grys mają uziarnienia w granicach nie przekraczających wymagań wg WT-1:2010 [N1] dotyczących betonów asfaltowych.

Badania materiałów kamiennych – gęstość

Oznaczenie gęstości materiałów kamiennych zostało wykonane metodą piknometryczną wg PN-EN 1097-6 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości” [N12] i PN-EN 1097-7 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna” [N13]. Metoda polega na obliczeniu ilorazu masy ziaren i ich objętości, określonej za pomocą piknomietru. Wyniki oznaczenia przedstawia tabl. 5-39.

Tablica 5-39. Gęstości kruszyw i wypełniacza

Rodzaj kruszywa	Gęstość, [g/cm ³]
Grys gabro Słupiec 8/11	2,991
Grys gabro Słupiec 5/8	2,975
Grys gabro Słupiec 2/5	2,962
Piasek łamany z otoczków Paczków	2,651
Piasek niełamany	2,654
Mączka wapienna Wolica	2,700

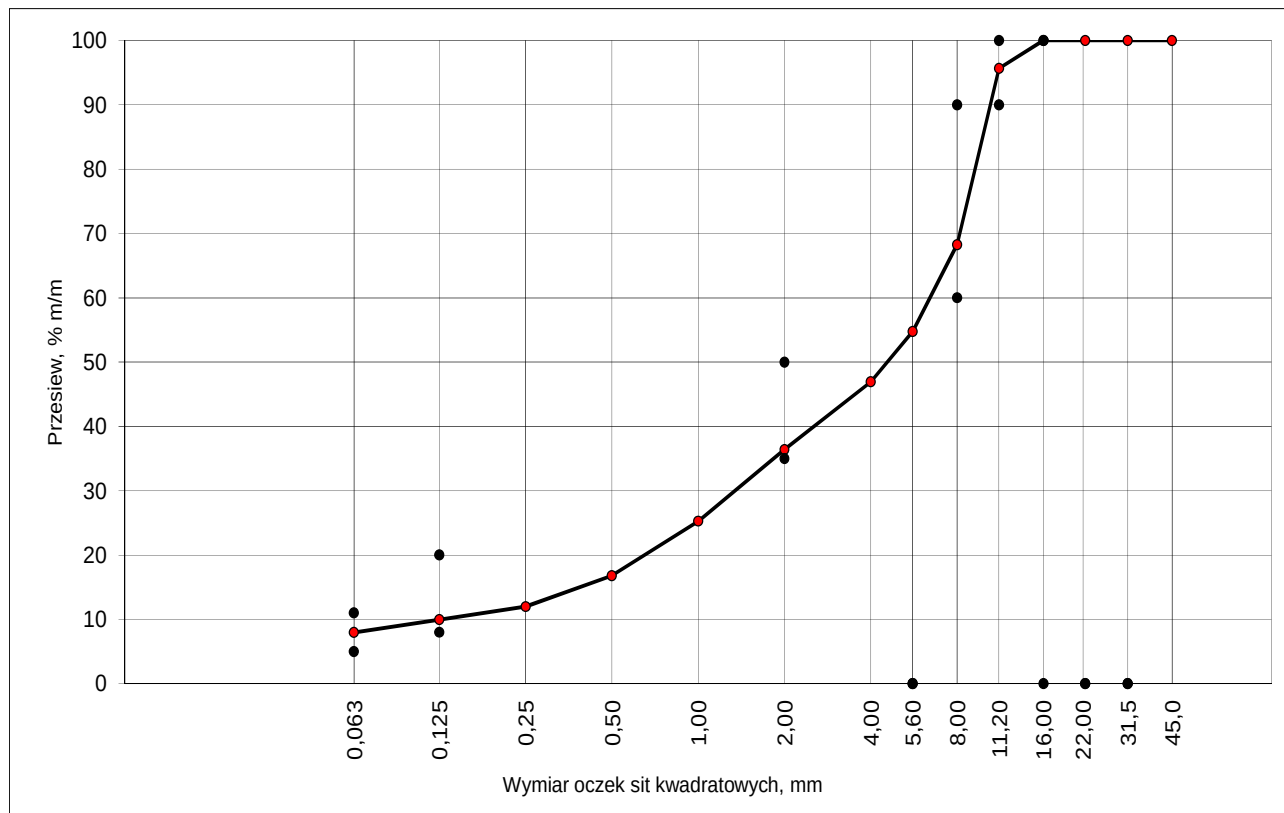
Gęstość kruszyw wykorzystano do ustalania współczynnika korygującego zawartość lepiszcza wg WT-2: 2010.

Ustalenie składu mieszanki mineralno-asfaltowej typu AC

Projekt mieszanki mineralnej

Mieszanke mineralno-asfaltową typu beton asfaltowy AC zaprojektowano wykorzystując wymagania zgodne z Wymaganiami Technicznymi WT-2: 2010 [N1]. Zaprojektowano jeden rodzaj mieszanki mineralno-asfaltowej typu AC 11, dla kategorii ruchu KR3 do KR6.

Krzywą uziarnienia zaprojektowanej mieszanki mineralnej do betonu asfaltowego AC 11 przedstawiono na rys. 5-26.



Rys. 5-26. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej do betonu asfaltowego AC 11

Ustalenie zawartości wolnej przestrzeni w mieszance typu AC

W celu zaprojektowania optymalnego składu AC, przeprowadzono badania gęstości mieszanki mineralno-asfaltowej AC wg PN-EN 12697-5 [N16] i gęstości objętościowej zagęszczonej mieszanki AC wg PN-EN 12697-6 [N17]. Próbkę AC zagęszczano po 75 uderzeń ubijaka Marshalla na każdą stronę próbki. Na podstawie uzyskanych wyników badań obliczono zawartość wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach zgodnie z PN-EN 12697-8 [N18]. Wyniki badań gęstości i gęstości objętościowej mieszanki mineralno-asfaltowej oraz obliczone zawartości wolnej przestrzeni AC 11 przedstawiono w tabl. 4-65 (punkt 4.4.3).

Na podstawie uzyskanych wyników badań zawartości wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach AC 11 stwierdzono, że zaprojektowany skład mieszanki mineralnej, przy zawartości lepiszcza 5,4% (m/m), pozwalają na uzyskanie optymalnej zawartości wolnej przestrzeni, na poziomie około 2,1% (m/m), co powinno zapewnić dużą szczelność warstwy ochronnej i ścieralnej nawierzchni mostowej.

Ostateczny skład mieszanki mineralno-asfaltowej

Ostateczny skład mieszanki mineralno-asfaltowej typu AC 11 przedstawiono w tabl. 5-40.

Tablica 5-40. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej (mma) typu AC 11

Składniki mma	Skład mma [%]
Lepiszczce	5,4
Mączka wapienna Wolica	8,5
Piasek łamany z otoczków Paczków	28,4
Grys gabra Słupiec 2/5	9,5
Grys gabra Słupiec 5/8	17,0
Grys gabra Słupiec 8/11	31,2
	100,0

Idea projektowania nawierzchni odpornych na deformacje trwałe polega na założeniu, że szkielet grysowy klinujących się ziaren, zapewni taką odporność warstw o grubości około 2,5 cm do 4,0 cm, nawet przy zwiększonej zawartości lepiszcza. W zaprojektowanym składzie AC 11, łączna zawartość frakcji grysowej wynosi 58% (m/m), co powinno zapewnić odporność nawierzchni na deformacje trwałe.

Program badań betonu asfaltowego

Oddziaływanie wysokiej temperatury podczas procesów technologicznych może powodować zmianę właściwości lepiszczy a tym samym, zmianę właściwości lepkością mieszank mineralno-asfaltowych. W okresie eksploatacji obiektu mostowego, mieszanki mineralno-asfaltowe do warstw ochronnych i ścieralnych nawierzchni mostowych podlegają procesom starzenia długoterminowego (eksploatacyjnego).

W celu określenia odporności na wysokie temperatury przy wytwarzaniu, transporcie i układaniu mieszank mineralno-asfaltowych, luźną mieszankę betonu asfaltowego AC poddano symulacji starzenia krótkoterminowego metodą STOA (Short Term Oven Aging), w warunkach laboratoryjnych, wg Załącznika 2 do WT-2:2013 [N19]. Mieszankę wygrzewano w temperaturze 135°C przez 2 godziny a następnie w temperaturze zagęszczania przez kolejną godzinę, w warstwie około 25-50 mm. Łączny

czas wygrzewania wynosił 3 godziny. Po procesie wygrzewania zaformowano próbki cylindryczne Marshalla $\varnothing$ 100 mm.

Próbki betonu asfaltowego AC zostały wykonane z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 (warstwa ścieralna) oraz z polimeroasfaltem PmB 25/55-60 (warstwa ochronna).

W celu oceny zmian właściwości betonu asfaltowego pod wpływem starzenia krótkoterminowego (STOA) wykonano badania modułu sztywności oraz odporności na działanie wody i mrozu próbek AC nie starzonych oraz poddanych starzeniu STOA.

Zaformowane próbki po starzeniu STOA poddano następnie symulacji starzenia długoterminowego LTOA (Long Term Oven Aging) w warunkach laboratoryjnych. Metodę starzenia LTOA opisano w [46]. Zagęszczone próbki mieszanki mineralno-asfaltowej wygrzewano w temperaturze 85°C w suszarce z wentylacją (z obiegiem powietrza) przez 5 dni (5×24 godziny).

W celu oceny zmian właściwości betonu asfaltowego pod wpływem starzenia krótkoterminowego i długoterminowego (STOA+LTOA) wykonano badania modułu sztywności oraz odporności na działanie wody i mrozu próbek AC poddanych starzeniu STOA+LTOA.

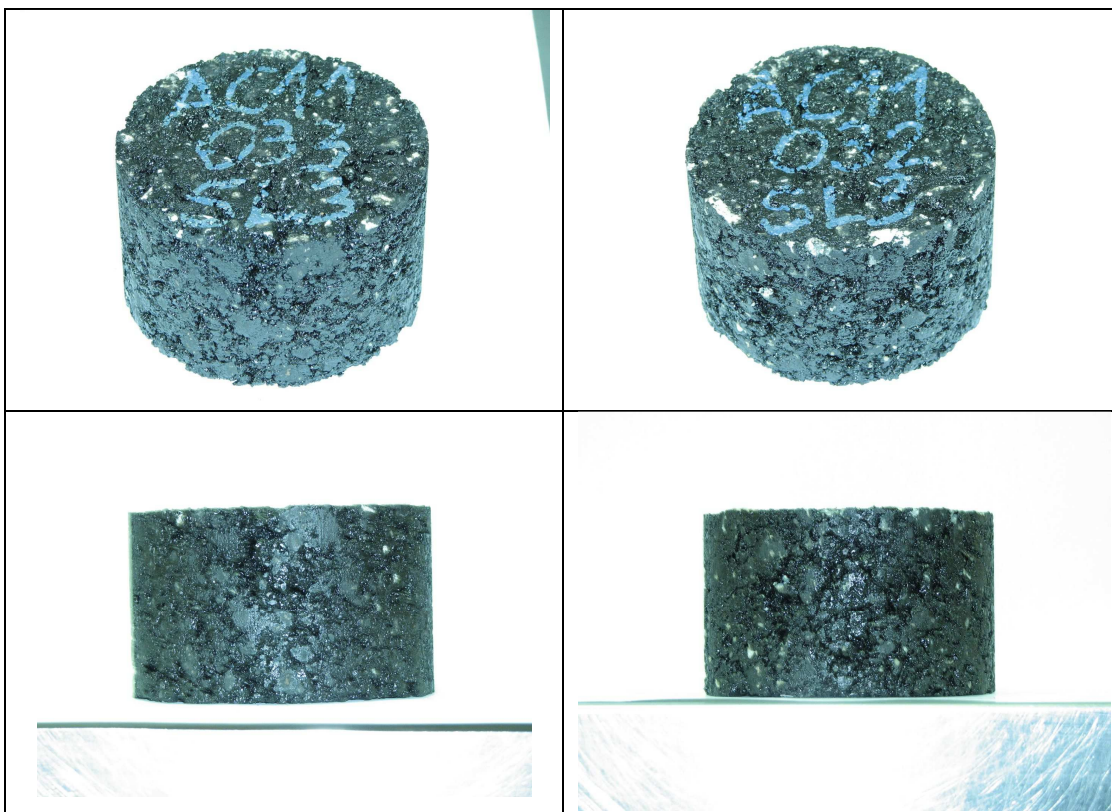
Szczegółowy program badań AC do warstw nawierzchni mostowych przedstawiono poniżej:

- symulacja starzenia krótkoterminowego (STOA) luźnej mma, w warstwie 25-50 mm, w temperaturze 135°C przez 2 godziny oraz w temperaturze zagęszczania przez jedną godzinę, wg Załącznika 2 do WT-2_2013 [N19],
- symulacja starzenia długoterminowego (LTOA) zagęszczonej mma (po wcześniejszym starzeniu STOA), w temperaturze 85°C, w suszarce z obiegiem powietrza, przez 5 dni (5×24 godziny), wg [46],
- pomiar modułu sztywności w rozciąganiu pośrednim w temperaturze 10°C, metoda IT-CY wg PN-EN 12697-26 [N15],
- pomiar odporności na działanie wody i mrozu w temperaturze 25°C (wskaźnik ITSR) wg PN-EN 12697-12 [N25] i PN-EN 12697-23 [N26].

Badanie modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej opisano szczegółowo w punkcie 4.3.1. a badanie odporności na działanie wody i mrozu w punkcie 4.4.2.

Wyniki badań betonu asfaltowego AC

Wygląd powierzchni próbek AC po procesie starzenia długoterminowego LTOA pokazano na rys. 5-26 do 5-27.



Rys. 5-26. Beton asfaltowy AC 11 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 po starzeniu długoterminowym LTOA

Rys. 5-27. Beton asfaltowy AC 11 z polimeroasfaltem PmB 25/55-60 po starzeniu długoterminowym LTOA

Na podstawie oceny wizualnej zmiany wyglądu próbek AC poddanych starzeniu długoterminowemu stwierdzono, że zagęszczone próbki nie uległy deformacji w wyniku wygrzewania w temperaturze 85°C przez 5 dni. Odpowiednio rozwinięty, nośny szkielet grysowy w mieszankach tego typu, zapewnia wysoką odporność na deformacje trwałe.

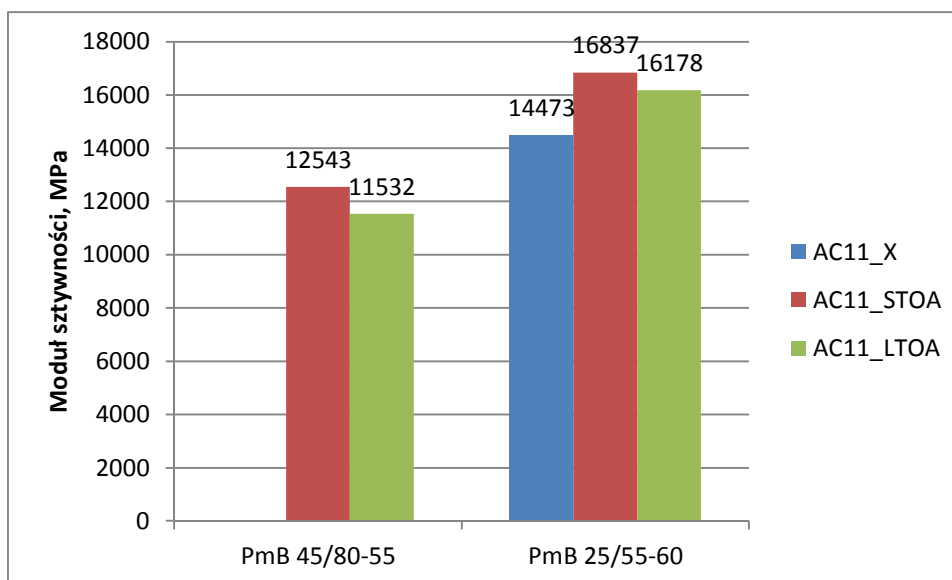
Moduł sztywności próbek AC w funkcji starzenia

Wyniki badania zmiany modułu sztywności betonu asfaltowego AC 11 stosowanego do wykonywania warstw nawierzchni na pomostach obiektów inżynierskich, poddanego starzeniu długoterminowemu (LTOA) przedstawiono w tabl. 5-41.

Na rys. 5-28 przedstawiono w formie graficznej wyniki badań modułu sztywności mieszanki AC 11 w funkcji starzenia długoterminowego.

Tablica 5-41. Wyniki badań modułu sztywności betonu asfaltowego AC 11 przed i po starzeniu STOA i LTOA

Rodzaj lepiszcza w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	Moduł sztywności w temperaturze 10°C [MPa]
PmB 45/80-55	AC11_X	-	-
	AC11_STOA	85	12543
	AC11_LTOA	135 i temperatura zagęszczania	11532
PmB 25/55-60	AC11_X	-	14473
	AC11_STOA	135 i temperatura zagęszczania	16837
	AC11_LTOA	85	16178



Rys. 5-28. Wyniki badań modułu sztywności betonu asfaltowego AC 11 w funkcji starzenia STOA i LTOA

Na podstawie analizy wyników badania zmian modułu sztywności IT-CY betonu asfaltowego AC 11 do warstw nawierzchniowych pomostu obiektu inżynierskiego przedstawionych w tabl. 5-41 oraz na rys. 5-28 stwierdzono, że moduł sztywności mieszanki AC z polimeroasfaltem PmB 25/55-60 wzrasta w wyniku starzenia krótkoterminowego STOA a następnie nieznacznie maleje w wyniku starzenia długoterminowego LTOA.

Należy wnioskować, że beton asfaltowy AC 11 z polimeroasfaltami charakteryzuje się odpowiednią odpornością na starzenie krótko- i długoterminowego.

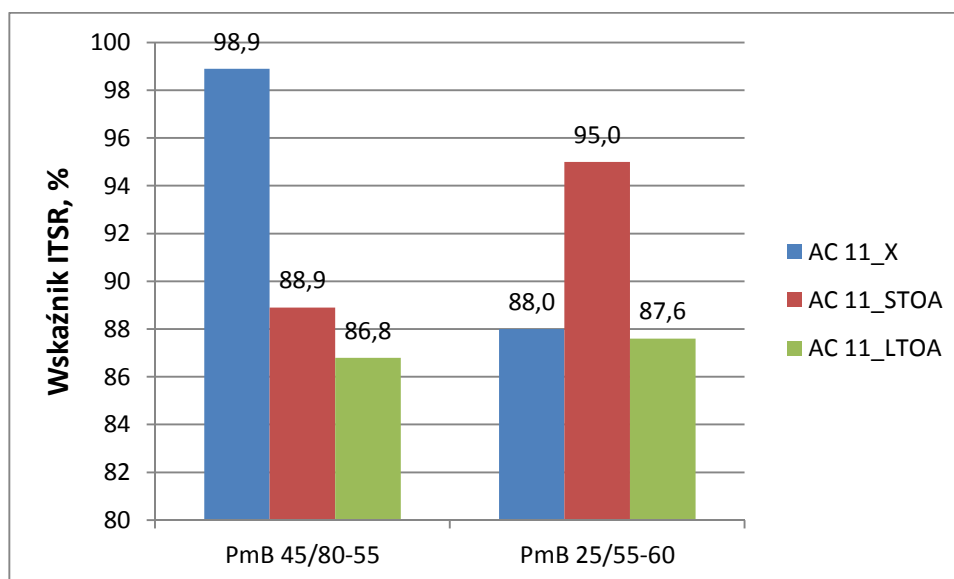
Odporność na działanie wody i mrozu próbek AC w funkcji starzenia

W tabl. 5-42 i na rys. 5-29 przedstawiono wyniki badania wskaźnika ITS_R odporności na działanie wody i mrozu betonu asfaltowego AC 11 w funkcji starzenia długoterminowego LTOA. Wskaźnik ITS_R obliczono na podstawie badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek poddanych kondycjonowaniu w wodzie ITS_w oraz próbek suchych ITS_d.

Tablica 5-42. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie pośrednie betonu asfaltowego AC 11 przed i po starzeniu STOA i LTOA

Rodzaj lepiska w mma	Oznaczenie próbki mma	Temperatura wygrzewania [°C]	ITS _w [MPa]	ITS _d [MPa]	Wskaźnik ITS _R * [%]
PmB 45/80-55	AC11_X	-	1,03	1,04	98,9
	AC11_STOA	135 i temperatura zagęszczania	1,25	1,40	88,9
	AC11_LTOA	85	1,35	1,55	86,8
PmB 25/55-60	AC11_X	-	1,61	1,83	88,0
	AC11_STOA	135 i temperatura zagęszczania	1,71	1,80	95,0
	AC11_LTOA	85	1,72	1,96	87,6

* próbki zagęszczane po 35 uderzeń ubijaka na każdą stronę



Rys. 5-29. Wskaźnik ITS_R betonu asfaltowego AC 11 w funkcji starzenia STOA i LTOA

Miarodajną ocenę odporności zagęszczonej mieszanki mineralno-asfaltowej na działanie wody z jednym cyklem zamrażania, jest badanie odporności na działanie wody wg PN-EN 12697-12 [N25]. Na podstawie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie zestawu „mokrego” próbek i zestawu „suchego” obliczono wskaźnik ITSR, którego sposób obliczania przedstawiono w punkcie 4.4.2.

Na podstawie analizy wyników badania wskaźnika ITSR betonu asfaltowego AC 11 stosowanego do warstw nawierzchni na obiekcie inżynierskim, przedstawionych w tabl. 5-42 i na rys. 5-29 można stwierdzić, że:

- mieszanka wyjściowa AC 11 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 charakteryzuje się bardzo wysoką wartością wskaźnika, około 99% i spełnia wymagania WT-2: 2010;
- w wyniku starzenia krótkoterminowego STOA mieszanki AC 11 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55 następuje znaczne obniżenie wskaźnika ITSR (o 10%);
- starzenie długoterminowe wpływa na dalsze, niewielkie obniżenie wskaźnika ITSR mieszanki AC 11 z polimeroasfaltem PmB 45/80-55.
- mieszanka wyjściowa AC 11 z polimeroasfaltem PmB 25/55-60 charakteryzuje się wartością wskaźnika ITSR nieznacznie poniżej wymaganej wartości 90%;
- wskaźnik ITSR mieszanki AC 11 z polimeroasfaltem PmB 25/55-60 po starzeniu krótkoterminowym STOA ma wysoką wartość (ITSR = 95%) i mieszanka ta spełnia wymagania WT-2: 2010. Zjawisko zwiększenia odporności na działanie wody i mrozu mieszanki po starzeniu STOA może być spowodowane kontynuacją reakcji polimeru z asfaltem w temperaturze starzenia krótkoterminowego, wynoszącej około 135°C;
- starzenie długoterminowe wpływa na obniżenie wskaźnika ITSR mieszanki AC 11 z polimeroasfaltem PmB 25/55-60 o około 7,5%.

Należy zauważyć, że wg nowego projektu Wymagań Technicznych WT-2 z 2013 roku minimalna wartość wskaźnika ITSR mieszanek typu AC S, do warstw ścieralnych, kategorii ruchu KR5-KR7 została obniżona do 85%.

6 OPRACOWANIE ZALECEŃ DOTYCZĄCYCH STOSOWANIA ROZWIĄZAŃ MATERIAŁOWO-TECHNOLOGICZNYCH IZOLACJI I NAWIERZCHNI MOSTOWYCH ODPORNYCH NA ZMĘCZENIE, KOLEINOWANIE, DZIAŁANIE WODY ORAZ TEMPERATURY

Z punktu widzenia doboru materiałów do konstrukcji mostowych nawierzchni asfaltowych, największe znaczenie ma rodzaj podłoża, na którym sytuje się tą konstrukcję. Wśród szeregu warstw (adhezyjna, izolacyjna, ochronna i ścieralna) ważną rolę pełni warstwa izolacyjna. Ta część konstrukcji mostowej nawierzchni asfaltowej jest najbardziej narażona na naprężenia rozciągające, nie tylko podczas oddziaływań zewnętrznych (od ruchu samochodowego), ale również oddziaływań od wahań temperatur (zmiany pór roku). Ze względu na w/w parametry ta sama izolacja będzie podlegała oddziaływaniom zróżnicowanych naprężeń, z tym, że trudniejsze warunki eksploatacji są przypisane warstwie izolacyjnej na płycie ortotropowej mostu stalowego.

Poza zagadnieniami współpracy fizyczno-chemicznej i mechanicznej warstw izolacyjnych z podłożem dwóch rodzajów, odmienne są również wymagania w stosunku do przygotowania podłoża do współpracy z warstwą izolacyjną. O ile podłoże betonowe nie wymaga specjalnych warstw adhezyjnych (związany i dojrzały beton doskonale współpracuje z materiałem węglowodorowym), to stal wymaga zabezpieczeń antykorozyjnych. Doświadczenia krajowe nasuwają koncepcje stosowania zabezpieczenia (poprzez malowanie) wszystkich elementów stalowych (w tym szczególnie płyty ortotropowej) farbą (lub emalią) chemoodporną z żywicą epoksydową.

6.1 Zalecenia dotyczące stosowania rozwiązań materiałowo-technologicznych izolacji przeciwwodnych płyt pomostów obiektów mostowych

Izolacja asfaltowa arkuszowa

Wady i zalety stosowania izolacji asfaltowych arkuszowych na pomostach obiektów mostowych przedstawiono w tabl. 6-1.

Tablica 6-1. Wady i zalety izolacji asfaltowych arkuszowych jako izolacji przeciwwodnych

Rodzaj masy powłokowej	Rodzaj płyty pomostu			
	Stal		Beton (żelbet)	
Papy termozgrzewalne	Wady:	Zalety:	Wady:	Zalety:
	- wymagają suchego, równego i czystego podłoża, - zmienne warunki atmosferyczne wykluczają prowadzenie robót	zwiększona odporność na odkształcenia (parametry osnovy)	- wymaga suchego, równego podłoża co może rzutować na harmonogram robót (szczególnie przy remontach obiektów) - klejenie papy na gorąco (poza niekorzystnym przegrzaniem asfaltu) nie usuwa całkowicie wilgoci z podłoża, zamykając ją w podłożu (tworzy dla niej szczelną warstwę),	zwiększona odporność na odkształcenia (parametry osnovy)
Papy samoprzylepne	Wady:	Zalety:	Wady:	Zalety:
	- wydłużony czas aplikacji (konieczność odparowania lotnych składników z impregnatów) - niższa adhezja do podłoża w stosunku do pap na gorąco	- wykonawstwo w temp. otoczenia, - nie wymaga skomplikowanego sprzętu	wydłużony czas aplikacji (konieczność odparowania lotnych składników z impregnatów), zwłaszcza w przypadku wykonywania głębokich reprofiliacji płyty (remonty)	- wykonawstwo w temp. otoczenia, - nie wymaga skomplikowanego sprzętu

Z tabl. 6-1 wynika, że papy termozgrzewalne wymagają czystego i suchego podłoża oraz stałej kontroli procesu ogrzewania spodniej warstwy papy. Brak ciągłości połączenia „papa-podłoże” będzie skutkował szybszą degradacją warstw asfaltowych. Papy wentylowane eliminują zjawisko wybrzuszeń, ale wymagają kompozytów impregnujących (często na bazie lepiszczy bitumicznych z udziałem rozpuszczalników organicznych o wysokiej prężności par). Papy samoprzylepne wymagają stosowania impregnatów z lepiszczy upłynnianych rozpuszczalnikami organicznymi. To z kolei wymaga obok czystego i suchego podłoża stosunkowo długiego okresu aplikacji impregnatu (odparowanie lotnych składników). Dodatkowym mankamentem jest gorsza adhezja w stosunku do pap w technologii na gorąco. W podsumowaniu należy stwierdzić, że stosowanie jako izolacji papy termozgrzewalnej jest akceptowane przy zachowaniu szczególnych warunkach wykonawstwa i nadzoru natomiast papę samoprzylepną należy uznać w tym przypadku jako materiał niezalecany. Papy samoprzylepne można dopuścić do stosowania jedynie w przypadku zapewnienia przyczepności do podłoża na poziome przyczepności pap termozgrzewalnych.

Wieloletnie doświadczenia ze stosowania pap termozgrzewalnych wskazują na potrzebę zwrócenia uwagi na następujące trudności przy stosowaniu tej technologii:

- podczas aplikacji papy termozgrzewalnej może dochodzić do przepalenia i skoksowania pewnej ilości lepiszcza, co nie pozostaje bez wpływu na sprawność techniczną wbudowanej izolacji. Należy bezwzględnie stosować sterowanie automatyczne podgrzewaniem papy;

- nawet przy suchym (pozbawionym wody) podłożu podczas podgrzewania palnikiem w wyniku procesu spalania wydzielają się głównie dwie substancje gazowe: dwutlenek węgla i para wodna. Ponieważ temperatura powietrza w sąsiedztwie palnika jest stosunkowo wysoka, to również ilość wilgoci jest duża (wilgotność bezwzględna) i tym większa, im większe jest zawilgocenie podłoża. Nie ma wątpliwości, że duża część gorącego powietrza podlega uwięzieniu pod przyklejoną papą, co wpływa na jakość i trwałość adhezji papy do podłoża. Zatrzymana wilgoć, w zależności od pory roku i temperatury zewnętrznej, zmienia swoje stany skupienia (a tym samym i objętość), czyniąc kolejne szkody w adhezji papy do podłoża. W przypadku stwierdzenia występowania pęcherzy w warstwach izolacyjnych należy niezwłocznie przystąpić do ich usuwania. Stan przyklejenia papy do podłoża należy koniecznie sprawdzać za pomocą metody „Pull-off”;
- szczególnie trudnym miejscem eksploatacji tych wyrobów są krawędzie oraz obszary położone przy dylatacjach. Są to miejsca w konstrukcji jezdni na obiekcie mostowym, które w głównej mierze decydują o trwałości nawierzchni, dlatego należy te prace wykonywać ze szczególną starannością.

Izolacja asfaltowa powłokowa

Do grupy izolacji asfaltowych powłokowych należy zaliczyć lepiszcza asfaltowe (najczęściej z dodatkami¹), układane w technologii na gorąco i zimno. Wady i zalety stosowania mas powłokowych asfaltowych jako izolacji przeciwwodnych przedstawiono w tabl. 6-2.

Tablica 6-2. Wady i zalety mas powłokowych asfaltowych jako izolacji przeciwwodnych

Rodzaj masy powłokowej	Rodzaj płyty pomostu			
	Stal		Beton (żelbet)	
Masy na gorąco	Wady: ▪ konieczność podgrzewania do stosunkowo wysokiej temperatury, ▪ konieczność stosowania asfaltów modyfikowanych elastomerem,	Zalety: ▪ usuwanie wilgoci zalegającej na podłożu, ▪ dokładne pokrycie płyty na całej powierzchni przy zbliżonym poziomie szczepności,	Wady: ▪ konieczność podgrzewania do stosunkowo wysokich temperatur,	Zalety: ▪ usuwanie wilgoci zalegającej na podłożu, ▪ penetracja lepiszcza w głąb, ▪ bardzo dobra adhezja lepiszcza do powierzchni
Masy na zimno	Wady: ▪ długi czas aplikacji (konieczność odparowania wody z emulsji lub rozpuszczalnika z asfaltów upłynnionych), ▪ wydzielające się opary podczas wiązania (zanieczyszczenie środowiska naturalnego),	Zalety: ▪ brak konieczności podgrzewania masy, ▪ możliwość aplikacji w zróżnicowanych warunkach atmosferycznych (niższa temperatura powietrza, wiatr),	Wady: ▪ długi czas aplikacji (konieczność odparowania wody z emulsji lub rozpuszczalnika z asfaltów upłynnionych), ▪ wydzielające się opary podczas wiązania (zanieczyszczenie środowiska naturalnego),	Zalety: ▪ brak konieczności podgrzewania masy, ▪ możliwość aplikacji w zróżnicowanych warunkach atmosferycznych (niższa temperatura powietrza, wiatr),

Z tabl. 6-2 wynika, że asfalty drogowe i modyfikowane w technologii na gorąco powinny być stosowane na suche i czyste podłoże w temperaturze zapewniającej dobre połączenie i możliwość

¹ W roli dodatków stosuje się żywice organiczne typu termoplastycznego o wyraźnym charakterze elastomerowym

penetracji w głąb struktury materiału (beton). Decydującym jest tu lepkość lepiszcza, która powinna być niższa niż $0,2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. W przypadku emulsji asfaltowych i asfaltów upłynnionych bardzo ważnym czynnikiem jest wydłużony czas aplikacji, który może spowodować, np. zanieczyszczenie, zapylenie zaimpregnowanej powierzchni. Może to skutkować brakiem szczepności, czego efektem może być pojawianie się wybrzuszeń podczas wbudowywania MMA bądź przyspieszone zniszczenia (spękania) na etapie eksploatacji obiektu. W posumowaniu technologii izolacji z mas na gorąco można zakwalifikować do technologii zalecanych i preferowanych a izolacje z mas na zimno do technologii mniej zalecanych.

Przy stosowaniu izolacji asfaltowych powłokowych należy uwzględnić następujące wymagania:

- lepiszcza asfaltowe powinny być rozkładane automatycznie, np. za pomocą skrapiałek (przy małych obiektach można dopuścić rozkładanie ręczne, przy czym proces ten powinien podlegać stałej kontroli) na czyste i suche podłoże (w przypadku wymagań producentów mieszanin z lepiszcza na gorąco – na podłoże zagruntowane).
- grubość warstwy lepiszcza asfaltowego nie powinna przekraczać 2-3 mm.
- jako izolację można stosować asfalty drogowe o średniej twardości (50/70, 70/100 i 100/150) oraz asfalty modyfikowane polimerami (np. elastomerem SBS: PMB 45/80-55, PMB 60-105/50).
- przy stosowaniu płynnych emulsji lepiszcza polimeroasfaltowego w wodzie bądź z udziałem rozpuszczalników węglowodorowych (benzyna lakowa, solwentnafta) należy bezwzględnie przestrzegać odpowiedniego czasu rozpadu emulsji lub odparowania rozpuszczalników. Do wad tego systemu izolacyjnego należy przede wszystkim długi okres (czas) dojrzewania wytrąconego z preparatu lepiszcza (modyfikowanego polimerem lub czystego asfaltu). Stąd duże uzależnienie jakości robót od warunków pogodowych.
- w miarę możliwości należy ograniczyć stosowanie izolacji z udziałem rozpuszczalników węglowodorowych ze względu na negatywny wpływ tej technologii na środowisko naturalne (preparaty zawierające w swoim składzie nisko i średniowrzące rozpuszczalniki węglowodorowe).
- parametrem, który należy uwzględnić przy wyborze rodzaju powłok, jest adhezja. Jest ona zdecydowanie większa (w przypadku płyt betonowych) przy aplikacji na gorąco.

Izolacja powłokowa z żywic epoksydowych

Żywice epoksydowe jako powłoki antykorozyjne stosuje się głównie do płyt ortotropowych.

Wady i zalety żywic epoksydowych jako izolacji przeciwwodnych na pomostach obiektów mostowych przedstawiono w tabl. 6-3.

Tablica 6-3. Wady i zalety żywic epoksydowych jako izolacji przeciwwodnych

Rodzaj płyty pomostu			
Stal		Beton (żelbet)	
Wady:	Zalety:	Wady:	Zalety:
▪ skomplikowana technologia produkcji i wbudowania żywicy epoksydowej (toksyczne opary i żrące ciecze) wymagają ścisłego przestrzegania przepisów BHP	▪ trwała warstwa antykorozyjna na stali podatnej na rdzewienie i korozję elektrochemiczną	nie dotyczy	nie dotyczy

Stosowanie żywic epoksydowych wymaga bardzo dokładnej kontroli oraz ciągłego nadzoru na etapie jej aplikacji. Podstawowym problemem przy stosowaniu jest wybór momentu wprowadzenia ziaren mineralnych w materiał malarski podczas jego utwardzania. Warstwa mineralna, poza polepszeniem szorstkości, ma spełniać rolę izolacji cieplnej, zabezpieczającej błonkę żywicy+epoksydowej przed bezpośrednim oddziaływaniem temperatury mieszanki mineralno-asfaltowej. Ważnym elementem przy wyborze żywic epoksydowych jest rodzaj utwardzacza. Będzie on kształtował podatność powłoki do odkształceń w wyniku zmian temperatury. Tę technologię izolacji należy uznać jako zalecaną do pomostów z płyt stalowych.

Izolacja powłokowa z żywic poliuretanowych

Poliuretany poza wieloma korzystnymi cechami i przydatnością w wielu dziedzinach przemysłu posiadają również istotne wady, np. duża toksyczność, zwiększona dodatkowo ich lotnością oraz obniżona odporność termiczna (np. już po przekroczeniu 100°C mogą ulegać rozkładowi). Próby remontów obiektów mostowych w Szwecji i Czechach zakończyły się powodzeniem natomiast w Polsce tą metoda ta okazała się w większości zastosowań nieskuteczna.

Wady i zalety żywic poliuretanowych jako izolacji przeciwwodnych na pomostach obiektów mostowych przedstawiono w tabl. 6-4.

Tablica 6-4. Wady i zalety żywic poliuretanowych jako izolacji przeciwwodnych

Rodzaj płyty pomostu			
Stal		Beton (żelbet)	
Wady:	Zalety:	Wady:	Zalety:
skomplikowana chemicznie technologia produkcji (opary toksyczne i żrące ciecze)	doskonała izolacyjność termiczna	nie dotyczy	nie dotyczy

Biorąc pod uwagę wady tej technologii i przede wszystkim toksyczność, technologię izolacji z żywic poliuretanowych należy uznać jako technologię niezalecaną.

Izolacja asfaltowe z mastyksu (tradycyjnego)

Mastyks tradycyjny był od dawna stosowany w nawierzchniach mostowych jako skuteczna i trwała mieszanka izolacyjna.

Wady i zalety izolacji z mastyksu tradycyjnego jako izolacji przeciwwodnych na pomostach obiektów mostowych przedstawiono w tabl. 6-5.

Tabl. 6-5. Wady i zalety izolacji z mastyksu tradycyjnego jako izolacji przeciwwodnej

Rodzaj płyty pomostu			
Stal		Beton (żelbet)	
Wady:	Zalety:	Wady:	Zalety:
właściwości fizyczno-chemiczne (izolacyjność wodna i cieplna) uzależniona od powierzchni właściwej frakcji <0,063 mm	wykazuje zarówno dobre cechy izolacyjne (szczelność mastyksu) jak i mechaniczne (kohezja, kąt tarcia)	wymaga równego i niespękanego podłoża. Głębokie spękania mogą powodować rozdzielenie (cedzenie) i utratę spójności (przy remontach)	wykazują bardzo dobrą przyczepność (adhezję) do podłoża betonowego. Za adhezję odpowiada lepiszcze bitumiczne, natomiast kąt tarcia wewnętrznego i kohezja warunkują nośność (mieszanka asfaltu, wypełniacza i piasku)

Z tabl. 6-5 wynika, że zasadniczą zaletą izolacji z mastyksu jest zadawalająca przyczepność do stali i bardzo dobra do betonu. Zrozumiałym jest, że tego typu warstwa izolacyjna wykazuje doskonałą kohezję (spójność) z warstwą ochronną. Kolejną zaletą mastyksu podgrzanego do temperatury 160-180°C jest przepuszczalność pary wodnej, która może powstawać w czasie układania masy na wilgotnym podłożu. W pewnych warunkach atmosferycznych, na powierzchni oczyszczonej i wysuszonej płyty pomostu może wykraplać się cienka, powierzchniowa warstwa wody. Mastyks zawierający średniej twardości lepiszcza, układany w cienkiej warstwie, wykazuje zdolności dyfuzyjne gazów i pary wodnej, w odróżnieniu od asfaltu lanego, produkowanego z twardszymi lepiszczami i układanego w grubszych warstwach. Właściwie zaprojektowany i wbudowany mastyks będzie charakteryzował się zdolnością do rozpraszania naprężeń (od pojazdów oraz warunków atmosferycznych) oraz zapewni dobre połączenie z warstwami nawierzchni jak również warstwą z kruszywa mineralnego, znajdującego się na powierzchni licowej emalii epoksydowej i dlatego tę izolację należy uznać jako zalecaną.

Przy wykonywaniu izolacji z mastyksu tradycyjnego należy przestrzegać następujących wymagań:

- izolację należy układać na suchym i czystym podłożu,
- grubość warstwy mastyksu powinna się mieścić w zakresie od 5 mm do 15 mm,
- asfalt zastosowany do mastyksu powinien być średniej twardości, w zakresie penetracji od 50/70 do 100/150,
- celem podwyższenia właściwości adhezyjnych i współpracy warstwy izolacyjnej z mastyksu, zwłaszcza z płytą ortotropową mostu, należy zwykły asfalt zastąpić polimeroasfaltem SBS (styren-butadien-styren),
- skład mieszanki mineralnej mastyksu tradycyjnego:

▪ gruby piasek (0,5÷2,0 mm)	15÷40%,
▪ drobny piasek (0,063÷0,5 mm)	10÷55%,
▪ wypełniacz (< 0,063 mm)	30÷50%.

Izolacja asfaltowa z asfaltu lanego

Stosowanie typowego asfaltu lanego w roli warstwy izolacyjnej nawierzchni mostowej ma na celu połączenie funkcji izolacyjnej i nośnej (warstwa ochronna) tego materiału.

Wykorzystanie asfaltu lanego w roli warstwy izolacyjnej na nowoczesnych obiektach mostowych budzi zastrzeżenia, przede wszystkim z powodu stosowania twardego lepiszcza asfaltowego (lub polimeroasfaltowego), koniecznego do uzyskania wysokiej kohezji mastyksu, odpowiedzialnego za odporność mieszanki na powstawanie trwałych deformacji. Płyty obiektów mostowych, szczególnie tych o dużej rozpiętości przęsła, ulegają odkształceniom na skutek wahań temperatur. Zatem podatnością do odkształceń powinna charakteryzować się również warstwa izolacyjna. Spełnienie tego wymagania w przypadku typowego asfaltu lanego może być trudne, m.in. ze względu na twarde lepiszcze (dodatkowo zestarzone w procesie mieszania z kruszywem) oraz dużą ilość szwów technologicznych (na stosunkowo niewielkiej powierzchni).

Wady i zalety izolacji z asfaltu lanego jako izolacji przeciwwodnych na pomostach obiektów mostowych przedstawiono w tabl. 6-6.

Tablica 6-6. Wady i zalety asfaltów lanych jako izolacji przeciwwodnych

Rodzaj płyty pomostu			
Stal		Beton (żelbet)	
Wady:	Zalety:	Wady:	Zalety:
▪ prawie całkowity brak dyfuzyjności gazów i pary wodnej (duża grubość warstwy, stosowane twardsze lepiszcza), ▪ długotrwały cykl produkcji, co przekłada się na występowanie znacznej ilości szwów technologicznych (szczególnie przy dużych obiektach), ▪ przy stosowaniu lepiszcz modyfikowanych może dochodzić do rozprężnięcia SBS-u (wysokie temperatury) i utraty właściwości elastycznych	▪ może stanowić dobre rozwiązanie w wykonawstwie nawierzchni na małych obiektach, dostosowanych do KR1-2	▪ prawie całkowity brak dyfuzyjności gazów i pary wodnej (duża grubość warstwy, stosowane twardsze lepiszcza), ▪ co przekłada się na podatność do tworzenia bąbli i wybrzuszeń, ▪ możliwość powstawania spękań w miejscach szwów technologicznych	▪ może stanowić warstwę hydroizolacyjną oraz nośną na obiektach o niewielkim obciążeniu ruchem (KR1-2)

Z tabl. 6-6 wynika, że izolacja z typowego asfaltu lanego może być stosowana na obiektach o małej rozpiętości. Asfalt lany można zastosować na obiektach o większej rozpiętości przede wszystkim w przypadku jego większej podatności do odkształceń poziomych. To wymaga zastosowania asfaltu o większej penetracji (bardziej miękkiego). Tym samym taka mieszanka będzie mniej odporna na odkształcenia plastyczne. Ograniczenie tego zjawiska wymagałoby wbudowywania asfaltu lanego w mniejszych grubościach, ok. 2-3 cm w stosunku do standardowej (4-5 cm). Podsumowując należy uznać technologię izolacji asfaltem lanym jako akceptowalną.

Przy wykonywaniu izolacji z asfaltu lanego należy przestrzegać następujących wymagań:

- wbudowywanie asfaltu lanego wymaga suchego i czystego podłoża,
- należy zwrócić uwagę, aby wbudowanie asfaltu lanego prowadzić przy bezwietrznej pogodzie. Nawet niewielki wiatr będzie prowadził do bardzo szybkiego wystudzenia powierzchni warstwy (będzie się tworzyć cienka, sztywna warstewka asfaltu), co ograniczy możliwość wydostania się na zewnątrz wilgoci zawartej w podłożu (szczególnie przy płytach betonowych). Efektem są rakowiny na powierzchni w postaci zastygłych pęcherzy,
- stałego nadzoru wymaga proces produkcji i wbudowywania oraz kontrola właściwości mieszanki.
- produkcja asfaltu lanego powinna odbywać się przy zastosowaniu systemu do podgrzewania wypełniacza.

Izolacja asfaltowa z mastyksu wysokogrysowego SMA/MA

Mastyksy wysokogrysowe (typu SMA) znalazły szerokie zastosowanie do budowy nawierzchni mostowych w warstwach ochronnej i ścieralnej. Mastyks SMA/MA charakteryzujący się dużo mniejszą zawartością wolnej przestrzeni i większą ilością lepiszcza w stosunku do standardowego SMA jest doskonałym materiałem do zastosowania jako izolacji przeciwwodnej na pomostach obiektów mostowych.

Wady i zalety izolacji z mastyksu wysokogrysowego SMA/MA jako izolacji przeciwwodnych na pomostach obiektów mostowych przedstawiono w tabl. 6-7.

Tablica 6-7. Wady i zalety mastyksów wysokogrysowych jako izolacji przeciwwodnych

Rodzaj płyty pomostu			
Stal		Beton (żelbet)	
Wady:	Zalety:	Wady:	Zalety:
▪ obniżona spójność (kohezja) mieszanki w wyniku mniejszej strukturyzacji lepiszcza na grubych ziarnach szkieletu mineralnego i niższej zawartości frakcji <0,063 mm,	▪ podatność do dyfuzji gazów i pary wodnej (w przypadku cienkiej warstwy) ▪ wysoka stabilność (nośność) dzięki dużej (65-80%) zawartości jednofrakcyjnego grys	▪ obniżona spójność (kohezja) mieszanki w wyniku mniejszej strukturyzacji lepiszcza na grubych ziarnach szkieletu mineralnego i niższej zawartości frakcji <0,063 mm,	▪ wysoka przyczepność do podłoża betonowego asfaltu „czystego” bądź polimeroasfaltu, ▪ krótki czas zagęszczania (przy zwiększonej ilości lepiszcza)

Z tabl. 6-7 wynika, że zwiększona zawartość lepiszcza w mieszance SMA/MA ułatwia i skraca proces zagęszczania oraz zapewnienia szczelności warstwy w trakcie eksploatacji nawierzchni. Wysoka zawartość grys sprzyja procesom otaczania na gorąco asfaltem bądź polimeroasfaltem, co ogranicza starzenie lepiszcza (otaczającego kruszywo w grubej błonce). Ukształtowana struktura kontaktowa cienkiej warstwy izolacyjnej z mieszanki SMA/MA pozwala, mimo szczelności warstwy, na stosunkowo łatwe odprowadzanie (przepuszczanie) pary wodnej, zalegającej w podłożu. Wbudowana mieszanka charakteryzuje się wysoką spójnością i wytrzymałością, co umożliwia prowadzenie ruchu technologicznego bez negatywnych skutków. Poza wyżej wymienionymi zaletami izolacja z mastyksu wysokogrysowego charakteryzuje się nie tylko wysoką szczepnością z asfaltową warstwą wyżej leżącą (wynik oddziaływania asfaltu na asfalt), ale również znaczną wytrzymałością na ścinanie (rozbudowana tekstura powierzchni – wystające grys). Izolacje tego typu mogą być stosowane zarówno na mostach stalowych jak i betonowych. Izolację z mieszanki SMA/MA należy zaliczyć do technologii zalecanych.

Przy wykonywaniu izolacji z mieszanki SMA/MA należy przestrzegać następujących wymagań:

- szczególnej kontroli powinna podlegać temperatura mieszanki SMA/MA,
- optymalnym rozwiązaniem jest połączenie warstwy SMA/MA z dodatkową warstwą lepiszcza (natryskiwanego na gorąco na płytę obiektu) w ilości ok. 1 kg/m². Poprawi to szczepność mastyksu z podłożem a gorąca warstewka spowoduje odparowanie wody w przypadku wystąpienia powierzchniowego zawilgocenia podłoża,
- grubość warstwy po zagęszczeniu nie powinna przekraczać 2,0-3,5 cm (zależnie od uziarnienia), ze względu na zwiększoną podatność do deformacji w wyniku rozpychania ziaren grys.

Izolacja asfaltowa powłokowa z płytami zabezpieczającymi

W obecnej dobie rozwoju powstają izolacje systemowe, oparte na lepiszczach asfaltowych modyfikowanych. Jednym z takich jest system płynnej hydroizolacji z asfaltu modyfikowanego z zabezpieczeniem powierzchni izolacji poprzez naklejenie sztywnych płyt.

Wady i zalety izolacji asfaltowej powłokowej z płytami zabezpieczającymi jako izolacji przeciwwodnych na pomostach obiektów mostowych przedstawiono w tabl. 6-8.

Tablica 6-8. Wady i zalety izolacji powłokowych z płytami zabezpieczającymi jako izolacji przeciwwodnych

Rodzaj płyty pomostu			
Stal		Beton (żelbet)	
Wady:	Zalety:	Wady:	Zalety:
▪ dużym utrudnieniem w stosowaniu tego typu izolacji jest preparatyka warstwy klejącej dwie połacie papy	▪ wysoka kohezja dzięki połączeniu polibutadienu (elastomeru) z asfaltem i składnikiem powodującym powstawanie kleju	▪ dużym utrudnieniem w stosowaniu tego typu izolacji jest preparatyka warstwy klejącej dwie połacie papy	▪ wysoka kohezja dzięki połączeniu polibutadienu (elastomeru) z asfaltem i składnikiem powodującym powstawanie kleju

Z tabl. 6-8 wynika, że izolacja asfaltowa powłokowa z płytami zabezpieczającymi może być stosowana na płytach betonowych i stalowych. Charakterystyka tego systemu sugeruje połączenie technologii izolacji w postaci płynnej (na zimno) z dodatkowym zabezpieczeniem w postaci płyty. Tak szczelna warstwa izolacji zapewnia zabezpieczenie płyty pomostu przed oddziaływaniem wody od góry, ale może stanowić przeszkodę dla odparowania wilgoci zalegającej w płycie betonowej. Eliminację tego zjawiska można uzyskać jedynie przy bardzo dobrym połączeniu warstwy płynnego lepiszcza z podłożem, którego adhezja będzie większa niż naprężenia wywołane wzrostem ciśnienia na skutek wzrostu objętości wody, zmieniającej się w parę. Do tego typu zjawisk będzie dochodziło na etapie wbudowywania mieszanki mineralno-asfaltowej, stanowiącej warstwę ochronną. Technologię izolacji asfaltowej powłokowej z płytami zabezpieczającymi należy uznać za technologię akceptowalną.

Izolacja asfaltowa powłokowa z płytami zabezpieczającymi mimo znaczących zalet wymaga przestrzegania reżimów technologicznych oraz przygotowania kadry wykonawczej. Błędy wynikające z przekroczenia czasu, temperatury aplikacji czy złego wymieszania składników mogą skutkować ograniczeniem żywotności nawierzchni.)

Izolacjonawierzchnia

Do nowych rozwiązań materiałowo-technologicznych stosowanych do systemów izolacyjno-nawierzchniowych obiektów mostowych należy zaliczyć izolacjonawierzchnie. Izolacjonawierzchnie są układane na powierzchniach jezdni i chodników mostowych a ich głównym zadaniem jest odcięcie płyty pomostu od niszczącego oddziaływania środowiska. Pełnią one funkcję zarazem izolacji tradycyjnych i warstw nawierzchni, są odporne na ścieranie i może się po nich odbywać ruch pieszey i kołowy. Do wykonywania chodników stosuje się izolacjonawierzchnie o grubości od 3 do 6 mm, do wykonywania nawierzchni jezdni mostów stosuje się izolacjonawierzchnie o grubości od 6 do 12 mm. Izolacjonawierzchnie wykonuje się z materiałów o spoiwie epoksydowym zmiekkczonym bitumami, epoksydowo-poliuretanowym i cementowo-polimerowym.

Izolacjonawierzchnie charakteryzują się wodoszczelnością i dobrą przyczepnością, odpornością na wpływy atmosferyczne, wysoką szorstkością, odpornością na działanie środków odladzających i trwałością. Zaletą izolacjonawierzchni jest ich znacznie niższa masa w porównaniu do nawierzchni mostowej z tradycyjnej mieszanki mineralno-asfaltowej.

Zastosowanie izolacjonawierzchni wymaga indywidualnego podejścia, uwzględniającego strukturę ruchu, prędkość ruchu, rodzaj płyty oraz typ mieszanki. Tego rodzaju rozwiązanie wymaga najwyższej jakości robót, począwszy od uzyskania dobrej szczepności mieszanki z podłożem, jej szczelności oraz odporności na działanie obciążeń od ruchu przy zapewnianiu podatności na odkształcenia poziome. Technologię izolacjonawierzchni należy uznać jako technologię zalecaną do szczególnych zastosowań.

Podsumowanie

W podsumowaniu zaleceń dotyczących stosowania izolacji przeciwwodnych na pomostach obiektów mostowych można sformułować następujące wnioski:

1. Wybór warstwy izolacyjnej do nawierzchni asfaltowej obiektów mostowych (stalowe, żelbetowe) powinien uwzględniać parametry techniczne izolacji (masy powłokowe, izolacje arkuszowe) i metody aplikacji (na gorąco, na zimno);
2. Na decyzję o wyborze materiału izolacyjnego powinny mieć wpływ warunki wbudowywania na otwartej przestrzeni i skład recepturalny (również chemiczny) izolacji i w tym kontekście sposób wbudowywania (na ciepło, gorąco i na zimno). Izolacje, w których składzie występują niebezpieczne dla środowiska naturalnego substancje (rozpuszczalniki, utwardzacze, rozcieńczalniki, produkty kondensacji itp.) powinny być ograniczane w użyciu technicznym;
3. Uwzględniając złożoność pojęcia „woda” (absorpcyjna, adsorpcyjna, międzypakietowa, konstytucyjna, krystalizacyjna itp.), należy w szerszym aspekcie spojrzeć na materiał o zwyczajowej nazwie „hydroizolacja”. Wynika to między innymi z możliwości wywołania reakcji chemicznych przy określonym składzie kompozytu, szczególnie przy technologiach, w których występują wysokie temperatury (ok. 200°C). W szerszym ujęciu hydroizolacja uniemożliwia dyfuzję makromolekuł (asocjatów) wody, a może być przepuszczalną dla małych cząsteczek różnych gazów, w tym pary wodnej.
4. Tradycyjnie stosowane rozwiązanie izolacji obiektu mostowego z papy termozgrzewalnej (lub samoprzylepnej) jest dobrym rozwiązaniem technologicznym pod warunkiem przestrzegania warunków układania samej izolacji jak i warstwy ochronnej z mieszanki mineralno-asfaltowej. Izolacja arkuszowa z papy jest szczególnie wrażliwa na długotrwałe przegrzanie w temperaturze 200°C oraz krótkotrwałe powyżej 250°C. Dlatego zaleca się unikanie przegrzania papy podczas jej układania oraz ograniczenie oddziaływania wysokiej temperatury od układanej mieszanki w warstwie ochronnej. Technika układania papy powinna eliminować do minimum ilość połączeń

arkuszy ze szczególną dbałością o jakość wykonanych połączeń oraz obróbkę urządzeń wyposażenia obiektu.

5. Z pewną rezerwą należy podchodzić do asfaltu lanego w roli hydroizolacji, ponieważ MMA z tak wysoką zawartością wypełniacza i asfaltu jest izolacją nie tylko dla wysoko zasocjowanej wody, ale również wszelkiego rodzaju gazów (rozpuszczalników, plastyfikatorów, pary wodnej);
6. Wykonawstwo w warunkach polowych izolacji poliuretanowej jest trudnym przedsięwzięciem technicznym, ponieważ roboty należy prowadzić w odpowiedniej temperaturze powietrza i jego wilgotności. Ponadto, ten preparat w swoich syntezach (poliaddycji) wykorzystuje specyficzne substancje (a zwłaszcza izocyjaniany), szkodliwe dla ludzi i środowiska naturalnego;
7. Najkorzystniejszą izolacją zarówno dla mostów stalowych jak i betonowych, uwzględniając właściwości fizyczno-chemiczne (nieprzepuszczalność asocjatów wody a przepuszczalność molekuł gazu) i mechaniczne (kąt tarcia wewnętrznego kruszywa), są kompozyty mastyksowe z większą lub mniejszą zawartością frakcji powyżej 2 mm. Ten typ warstwy izolacyjnej w pewnym stopniu warunkuje rodzaj kolejnych warstw konstrukcji nawierzchni, które powinny charakteryzować się określoną wolną przestrzenią, dającą swobodę przemieszczeń roztopionego lepiszcza pod wpływem pracy zagęszczenia, zgodnie z prawami hydrauliki (np. prawa Pascala);
8. Uwzględniając kontakt, a nawet mieszanie się lepiszcza kolejnych warstw w konstrukcji nawierzchni podczas zagęszczania, powinno się stosować identyczne lepiszcze (w przypadku polimeroasfaltów lepiszcze bazowe). Zachowanie zasady jednorodności zabezpiecza układ koloidalny polimeroasfaltu przed dezintegracją (zniszczenie układu koloidalnego) i utratą stabilności MMA kolejnych warstw.
9. Z rozważanych dwóch rodzajów płyt obiektów mostowych (stalowe, żelbetowe) jedynie płyty stalowe wymagają zabezpieczeń antykorozyjnych (rdzewienie, korozja elektrochemiczna). Ze względu na specjalistyczny charakter prac związanych z oczyszczaniem i pokrywaniem płyt żywicami epoksydowymi, powinny je wykonywać wyspecjalizowane jednostki. Postęp tych prac powinien podlegać ścisłemu nadzorowi (również naukowemu), szczególnie ze względu na konieczność uszarniania powierzchni licowej żywicy drobnym kruszywem. Przy wyborze rodzaju żywicy należy przedstawić wymagania materiałowe, tzn. odporność na zagrożenia korozyjne, rozpuszczalność i współdziałanie z asfaltem (adhezja i kohezja) oraz odporność na wysokie temperatury (przynajmniej do 180°C).
10. Nie przewiduje się prac zabezpieczających przed korozją na płytach betonowych, które bardzo dobrze współpracują (adhezja) z lepiszczem asfaltowym lub polimeroasfaltowym (ograniczenia w stosowaniu żywic epoksydowych i poliuretanowych na tego rodzaju powierzchniach). Prace przygotowawcze przed wbudowaniem warstwy izolacyjnej (np. z mastyksu wysokogrysowego) powinny polegać na dokładnym oczyszczeniu płyty, co zagwarantuje szczepność (adhezję). W przypadku remontów należy dodatkowo przeprowadzić prace związane z reprofilacją płyty (wypełnieniem ubytków i spękań zaprawami cementowymi lub cementowo-polimerowymi).
11. Zalecenia dotyczące wyboru, spośród wielu różnych izolacji, mastyków nisko- i wysokogrysowych wynikają z następujących właściwości technicznych, określonych na podstawie doświadczeń w skali makro oraz badań laboratoryjnych:
 - hydroizolacyjność przy jednoczesnej, ograniczonej paroprzepuszczalności gazów i pary wodnej,
 - dobra współpraca (adhezja) z materiałem podłoża (szczególnie w przypadku płyt betonowych) i warstw wyżej leżących,
 - określona nośność (kąt tarcia wewnętrznego, kohezja mastyksu), umożliwiająca przeniesienie ruchu technologicznego bez szkód dla warstwy izolacyjnej,
 - właściwości doskonałego spoinienia warstw nawierzchni, co zapewnia harmonijne przekazywanie obciążeń zewnętrznych na płytę pomostu.

6.2 Zalecenia dotyczące stosowania rozwiązań materiałowo-technologicznych warstw nawierzchni obiektów mostowych

Warstwa ochronna w nawierzchni obiektów mostowych odgrywa szczególną rolę, ponieważ oprócz funkcji przenoszenia obciążeń od pojazdów samochodowych spełniają rolę zabezpieczającą izolację i pomost przed zniszczeniem. Do warstwy ochronnej nawierzchni obiektów mostowych zaleca się stosować następujące mieszanki mineralno-asfaltowe:

- mastyksy SMA: **SMA 5** (KR1-KR3), **SMA 8** (KR1-KR7), **SMA 11** (KR3-KR7),
- betony asfaltowe: **AC 8** (KR1-KR4), **AC 11** (KR1-KR6),
- mieszanki SMA/MA: **SMA/MA 5** (KR1-KR3) , **SMA/MA 8**(KR1-KR7),
- asfalt lany: **MA 8** (KR1-KR7), **MA 11** (KR1-KR7).

Propozycje wymagań w stosunku do mieszanek mineralno-asfaltowych do warstwy ochronnej przedstawiono w tabl. 6-9 (SMA) i w tabl. 6-10 (beton asfaltowy).

Tablica. 6-9. Właściwości dla mieszanek SMA (o uziarnieniu do 5, 8 i 11 mm) o strukturze zamkniętej dla warstwy wiążącej (ochronnej) i kategorii ruchu KR 1-6

Właściwość	Warunki zagęszczenia wg PN-EN 13108-20	Metoda i warunki badania	Wymiar mieszanki		
			SMA 5	SMA 8	SMA 11
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.2, ubijanie, 2 x 35 uderzeń	PN-EN 12697-8, p.4	$V_{\max 1,5}$	$V_{\max 2,0}$	$V_{\max 2,5}$
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.2, ubijanie, 2 x 50 uderzeń	PN-EN 12697-8, p.4	$V_{\max 1,0}$	$V_{\max 1,5}$	$V_{\max 2,0}$
Odporność na deformacje trwałe warstwy wiążącej (ochronnej) ^{a)}	C.1.20, wałowanie, $P_{98} - P_{100}$	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 45°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR 0,80}$ PRD_{AIR} Deklarowane	$WTS_{AIR 0,50}$ PRD_{AIR} Deklarowane	
Odporność na deformacje trwałe pakietu warstw (ścieralnej i ochronnej) ^{b)}	C.1.20, wałowanie, $P_{98} - P_{100}$	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 50°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR 0,3}$ $PRD_{AIR 5,0}$	$WTS_{AIR 0,15}$ $PRD_{AIR 5,0}$	
Odporność na działanie wody	C.1.1, ubijanie, 2 x 35 uderzeń	PN-EN 12697-12, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania ^{a)} , badanie w 25°C	$ITSR_{90}$		
Spływność lepiszcza	-	PN-EN 12697-18, p.5	$D_{0,6}$		

a) Grubość płyty 20 mm dla SMA 5 i 30 mm dla SMA 8 i SMA 11

b) Grubość płyty dla pakietu warstw wynosi odpowiednio 6 cm i 7 cm (warstwa wiążąca z „SMA 5” 2 cm + warstwa ścieralna 4 cm oraz warstwa wiążąca z „SMA 8 lub SMA 11” 3 cm + warstwa ścieralna 4 cm)

c) Ujednoliconą procedurą badania odporności na działanie wody z jednym cyklem zamrażania – zał. nr 1 do WT-2 2010.

Tablica. 6-10. Właściwości dla betonów asfaltowych AC (o uziarnieniu do 8 i 11 mm) o strukturze zamkniętej dla warstwy wiążącej (ochronnej) i kategorii ruchu KR 1-6

Właściwość	Warunki zagęszczenia wg PN-EN 13108-20	Metoda i warunki badania	Wymiar mieszanki	
			AC 8	AC 11
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.2, ubijanie, 2 x 35 uderzeń	PN-EN 12697-8, p.4	$V_{max2,0}$	$V_{max2,5}$
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.2, ubijanie, 2 x 50 uderzeń	PN-EN 12697-8, p.4	$V_{max 1,5}$	$V_{max 2,0}$
Odporność na deformacje trwałe warstwy wiążącej (ochronnej) ^{a)}	C.1.20, wałowanie, $P_{98} - P_{100}$	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 45°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR 0,60}$ PRD_{AIR} Deklarowane	$WTS_{AIR 0,50}$ PRD_{AIR} Deklarowane
Odporność na deformacje trwałe pakietu warstw (ścieralnej i ochronnej) ^{b)}	C.1.20, wałowanie, $P_{98} - P_{100}$	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 50°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR 0,15}$ $PRD_{AIR 5,0}$	
Odporność na działanie wody	C.1.1, ubijanie, 2 x 35 uderzeń	PN-EN 12697-12, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania ^{c)} , badanie w 25°C	$ITSR_{90}$	
Spływność lepiszcza	-	PN-EN 12697-18, p.5	$D_{0,6}$	

^{a)} Grubość płyty 30 mm

^{b)} Grubość płyty dla pakietu warstw wynosi 7 cm (warstwa wiążąca 3 cm + warstwa ścieralna 4 cm)

^{c)} Ujednolicona procedura badania odporności na działanie wody z jednym cyklem zamrażania – zał. nr 1 do WT-2 2010.

W tabl. 6-11 do 6-13 przedstawiono wymagania w stosunku do kruszyw stosowanych do warstwy ochronnej dla mieszanki SMA i AC.

Tablica 6-11. Wymagane właściwości kruszywa grubego do warstwy wiążącej (ochronnej)

Właściwości kruszywa	Wymagania dla kategorii ruchu	
	KR 1-2	KR 3-6
Uziarnienie według PN-EN 933-1, kategoria nie niższa niż:	Gc90/15	Gc90/15
Tolerancje uziarnienia; odchylenia nie większe niż według kategorii:	G _{25/15}	G _{25/15}
Zawartość pyłu według PN-EN 933-1, kategoria nie wyższa niż:	f ₂	f ₂
Kształt kruszywa według PN-EN 933-3 lub według PN-EN 933-4, kategoria nie wyższa niż:	Fl ₂₅ lub Sl ₂₅	Fl ₂₀ lub Sl ₂₀
Procentowa zawartość ziaren o powierzchni przekruszonej i łamanej w kruszywie grubym według PN-EN 933-5, kategoria nie niższa niż:	C _{100/0}	C _{100/0}
Odporność kruszywa na rozdrabnianie, badanie na kruszywie o wymiarze 10/14 według normy PN-EN 1097-2, rozdział 5; kategoria nie wyższa niż:	LA ₃₀	LA ₂₅
Odporność na polerowanie kruszywa według PN-EN 1097-8, kategoria nie niższa niż:	PSV _{Deklarowana}	PSV _{Deklarowana}
Gęstość ziaren według PN-EN 1097-6, rozdział 7, 8 lub 9:	deklarowana przez producenta	deklarowana przez producenta
Gęstość nasypowa według normy PN-EN 1097-3:	deklarowana przez producenta	deklarowana przez producenta
Nasiąkliwość według PN-EN 1097-6,	WA ₂₄ Deklarowana	WA ₂₄ Deklarowana
Mrozoodporność według PN-EN 1367-6 w 1% NaCl; kategoria nie wyższa niż:	F _{NaCl} 7	F _{NaCl} 7
„Zgorzel słoneczna” bazaltu według PN-EN 1367-3, wymagana kategoria:	SB _{LA}	SB _{LA}
Skład chemiczny -uproszczony opis petrograficzny według PN-EN 9323:	deklarowany przez producenta	deklarowany przez producenta
Grube zanieczyszczenia lekkie według PN-EN 1744-1 p. 14.2, kategoria nie wyższa niż:	m _{LPC} 0,1	m _{LPC} 0,1
Rozpad krzemianowy żużla wielkopieczowego chłodzonego powietrzem według PN-EN 1744-1, p. 19.1:	wymagana odporność	wymagana odporność
Rozpad żelazowy żużla wielkopieczowego chłodzonego powietrzem według PN-EN 1744-1, p. 19.2:	wymagana odporność	wymagana odporność
Stalność objętości kruszywa z żużla stalowniczego według PN-EN 1744-1, p. 19.3; kategoria nie wyższa niż:	V _{3,5}	V _{3,5}

Tablica 6-12. Wymagane właściwości kruszywa łamanego drobnego do warstwy wiążącej (ochronnej)

Właściwości kruszywa	Wymagania dla kategorii ruchu	
	KR 1-2	KR 3-6
Uziarnienie według PN-EN 933-1, wymagana kategoria:	G_{F85}	G_{F85}
Tolerancja uziarnienia; odchylenie nie większe niż według kategorii:	G_{TC20}	G_{TC20}
Zawartość pyłu według PN-EN 933-1, kategoria nie wyższa niż:	f_{16}	f_{16}
Jakość pyłu według PN-EN 933-9; kategoria nie wyższa niż:	MB_{F10}	MB_{F10}
Kanciastość kruszywa drobnego według PN-EN 933-6, rozdział 8, kategoria nie niższa niż:	E_{cs30}	E_{cs30}
Gęstość ziaren według PN-EN 1097-6, rozdz. 7,8 lub 9	deklarowana przez producenta	deklarowana przez producenta
Grube zanieczyszczenia lekkie, według PN-EN 1744-1, p. 14.2, kategoria nie wyższa niż:	$m_{LPC0,1}$	$m_{LPC0,1}$
Nasiąkliwość wg PN-EN 1097-6 rozdz. 7,8 lub 9	WA ₂₄ Deklarowana	WA ₂₄ Deklarowana

Tablica 6-13. Wymagane właściwości wypełniacza do warstwy wiążącej (ochronnej)

Właściwości wypełniacza	Wymagania dla kategorii ruchu	
	KR 1-2	KR3-6
Uziarnienie według PN-EN 933-10:	zgodne z tablicą 24 wg PN-EN 13043	zgodne z tablicą 24 wg PN-EN 13043
Jakość pyłu według PN-EN 933-9, kategoria nie wyższa niż:	MB_{F10}	MB_{F10}
Zawartość wody według PN-EN 1097-5, nie wyższa niż:	1 %(m/m)	1 %(m/m)
Gęstość ziaren według PN-EN 1097-7	deklarowana przez producenta	deklarowana przez producenta
Wolne przestrzenie w suchym zagęszczonym wypełniaczu według PN-EN 1097-4, wymagana kategoria:	$V_{28/45}$	$V_{28/45}$
Przyrost temperatury mięknięcia według PN-EN 13179-1, wymagana kategoria:	$\Delta_{R\&B}8/25$	$\Delta_{R\&B}8/25$
Rozpuszczalność w wodzie według PN-EN 1744-1, kategoria nie wyższa niż:	WS_{10}	WS_{10}
Zawartość $CaCO_3$ w wypełniaczu wapiennym według PN-EN 196-21, kategoria nie niższa niż:	CC_{70}	CC_{70}
Zawartość wodorotlenku wapnia w wypełniaczu mieszanym, wymagana kategoria:	K_a Deklarowana	K_a Deklarowana
„Liczba asfaltowa” według PN-EN 13179-2, wymagana kategoria:	$BN_{Deklarowana}$	$BN_{Deklarowana}$

Propozycje wymagań w stosunku do mastyksu wysokogrysego (SMA/MA) do warstwy ochronnej przedstawiono w tabl. 6-14 do 6-16.

Do mastyksu wysokogrysego należy stosować następujące materiały:

- asfalt 50/70, 70/100, PMB 45/80-55, PMB 65/105-60 (dla ruchu KR3-6 oraz na płytach stalowych preferowany asfalt modyfikowany);
- kruszywo – wymagania wg WT-1:2010 jak dla warstwy ścieralnej z SMA w zależności od kategorii ruchu.

Tablica. 6-14. Właściwości mieszanki SMA/MA 11 o strukturze zamkniętej dla warstwy wiążącej (ochronnej)

Właściwość	Warunki zagęszczenia wg PN-EN 13108-20	Metoda i warunki badania	SMA/MA 11
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.2, ubijanie, 2 x 35 uderzeń	PN-EN 12697-8, p.4	$V_{\max 1,5}$
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.2, ubijanie, 2 x 50 uderzeń	PN-EN 12697-8, p.4	$V_{\max 1,0}$
Odporność na deformacje trwałe warstwy wiążącej (ochronnej) ^{a)}	C.1.20, wałowanie, $P_{98} - P_{100}$	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 45°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR 0,50}$ PRD_{AIR} Deklarowane
Odporność na deformacje trwałe pakietu warstw (ścieralnej i ochronnej) ^{b)}	C.1.20, wałowanie, $P_{98} - P_{100}$	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 50°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR 0,15}$ $PRD_{AIR 5,0}$
Odporność na działanie wody	C.1.1, ubijanie, 2 x 35 uderzeń	PN-EN 12697-12, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania ^{c)} , badanie w 25°C	$ITSR_{90}$
Splýwność lepiszcza	-	PN-EN 12697-18, p.5	$D_{0,6}$

^{a)} Grubość płyty **40 mm**

^{b)} Grubość płyty dla pakietu warstw **8 cm** (warstwa ochronna 4 cm + warstwa ścieralna 4 cm), warstwa ścieralna - np. SMA 11.

^{c)} Ujednoliconą procedurę badania odporności na działanie wody z jednym cyklem zamrażania podano w zał. nr 1 do WT-2: 2010.

Tablica. 6-15. Właściwości mieszanki SMA/MA 8 o strukturze zamkniętej dla warstwy wiążącej (ochronnej)

Właściwość	Warunki zagęszczenia wg PN-EN 13108-20	Metoda i warunki badania	SMA/MA 8
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.2, ubijanie, 2 x 35 uderzeń	PN-EN 12697-8, p.4	$V_{\max 1,5}$
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.2, ubijanie, 2 x 50 uderzeń	PN-EN 12697-8, p.4	$V_{\max 1,0}$
Odporność na deformacje trwałe warstwy wiążącej (ochronnej)a)	C.1.20, wałowanie, $P_{98} - P_{100}$	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 45°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR 0,50}$ PRD_{AIR} Deklarowane
Odporność na deformacje trwałe pakietu warstw (ścieralnej i ochronnej)b)	C.1.20, wałowanie, $P_{98} - P_{100}$	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 50°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR 0,15}$ $PRD_{AIR 7,0}$
Odporność na działanie wody	C.1.1, ubijanie, 2 x 35 uderzeń	PN-EN 12697-12, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania c), badanie w 25°C	$ITSR_{90}$
Spływność lepiszcza	-	PN-EN 12697-18, p.5	$D_{0,6}$

a) Grubość płyty **30 mm**

b) Grubość płyty dla pakietu warstw **7 cm** (warstwa ochronna 3 cm + warstwa ścieralna 4 cm), warstwa ścieralna - np. SMA 11.

c) Ujednoliconą procedurę badania odporności na działanie wody z jednym cyklem zamrażania podano w zał. nr 1 do WT-2: 2010.

Tablica. 6-16. Właściwości mieszanki SMA/MA 5 o strukturze zamkniętej dla warstwy wiążącej (ochronnej)

Właściwość	Warunki zagęszczenia wg PN-EN 13108-20	Metoda i warunki badania	SMA/MA 5
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.2, ubijanie, 2 x 35 uderzeń	PN-EN 12697-8, p.4	$V_{\max 1,5}$
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.2, ubijanie, 2 x 50 uderzeń	PN-EN 12697-8, p.4	$V_{\max 1,0}$
Odporność na deformacje trwałe warstwy wiążącej (ochronnej)a)	C.1.20, wałowanie, $P_{98} - P_{100}$	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 45°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR 0,50}$ PRD_{AIR} Deklarowane
Odporność na deformacje trwałe pakietu warstw (ścieralnej i ochronnej)b)	C.1.20, wałowanie, $P_{98} - P_{100}$	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 50°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR 0,15}$ $PRD_{AIR 9,0}$
Odporność na działanie wody	C.1.1, ubijanie, 2 x 35 uderzeń	PN-EN 12697-12, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania c), badanie w 25°C	$ITSR_{90}$
Spływność lepiszcza	-	PN-EN 12697-18, p.5	$D_{0,6}$

a) Grubość płyty **25 mm**

b) Grubość płyty dla pakietu warstw **6,5 cm** (warstwa ochronna 2,5 cm + warstwa ścieralna 4 cm), warstwa ścieralna - np. SMA 11.

c) Ujednoliconą procedurę badania odporności na działanie wody z jednym cyklem zamrażania podano w zał. nr 1 do WT-2: 2010.

Jako lepsze do warstwy ochronnej z mieszanki AC i SMA i SMA/MA zalecane jest stosowanie asfaltów drogowych i modyfikowanych (szczególnie przy obciążeniu ruchem KR3-KR7 oraz na płytach stalowych) o średniej twardości. Asfalty drogowe 50/70, 70/100 powinny odpowiadać wymaganiom normy PN-EN 12591. Asfalty modyfikowane polimerem (PMB 45/80-55, PMB 45/80-65, PMB 65-105/60) powinny odpowiadać wymaganiom normy PN-EN 14023.

Właściwości techniczne asfaltów lanych stosowanych do warstwy ochronnej nawierzchni mostowej powinny odpowiadać Wymaganiom Technicznym WT-2. W Wymaganiach WT-2: 2013 wprowadzono bardzo istotną zmianę dotyczącą stosowanych lepiszczy do warstw nawierzchni ze względu na ich odporność na wysoką temperaturę. Producenci polimerów, środowiska naukowe i wykonawcy robót drogowych zwracali uwagę na nieprecyzyjne zapisy dotyczące maksymalnych temperatur materiałów stosowanych do izolacji i warstw ochronnych. Należy pamiętać, że większość wytwórni mieszanek asfaltowych w Polsce nie ma systemu do podgrzewania wypełniacza. To oznacza, że zimny wypełniacz jest mieszany na sucho z pozostałym kruszywem podgrzanym do bardzo wysokiej temperatury. Jego łączenie z lepiszczem wymaga wydłużonego czasu mieszania na mokro (z asfaltem) i powoduje to niebezpieczeństwo przegrzania polimeroasfaltu i nie uzyskania jednorodnego materiału.

Wymagania Techniczne z 2013 roku wyeliminowały polimeroasfalty do stosowania do nawierzchni mostowych w warstwie ochronnej. Zaleca się stosowanie do warstw ochronnych MA 8 lub MA 11 lepiszcza 35/50 oraz asfaltu wielorodzajowego 35/50. Temperatura wytwarzania MA z asfaltami drogowymi powinna wynosić od 200 do 240°C. Temperatury technologiczne MA z polimeroasfaltami – według wskazań producenta.

Zaleca się stosowanie do asfaltu lanego dodatku asfaltu naturalnego w ilości 2% m/m. Dzięki temu polepsza się urabialność i zagęszczalność mieszanek mineralno-asfaltowych. Uzyskuje się ponadto wyraźne podwyższenie odporności na odkształcenia trwałe warstw nawierzchni wykonanych z tym dodatkiem oraz zwiększoną odporność na działanie wysokiej temperatury technologicznej.

Nowym rozwiązaniem materiałowo-technologicznym jest zastosowanie do asfaltu lanego dodatku rozdrobnionej gumy ze zużytych opon samochodowych. Technologia zaleca stosowanie do asfaltu lanego gumy dozowanej bezpośrednio do lepiszcza (metoda modyfikacji na mokro) oraz do kruszywa (metoda modyfikacji na sucho). Zaletą tego rozwiązania jest uzyskanie warstwy asfaltu lanego o podwyższonej izolacyjności termicznej i poprawionej odporności na spękania niskotemperaturowe.

Podsumowanie

W podsumowaniu przedstawiono zasady jakie należy przestrzegać przy wbudowywaniu mieszanek mineralno-asfaltowych w warstwie ochronnej:

1. przed rozpoczęciem wbudowywania warstwy ochronnej należy sprawdzić stan podłoża, które powinno być suche, czyste i jednorodne – w przypadku warstwy izolacyjnej arkuszowej (papy asfaltowe) dodatkowo należy sprawdzić jej szczepność z podłożem (miejsca nieprzyklejone wydają głuche odgłosy przy uderzeniu),
2. wolna przestrzeń w próbkach Marshalla do 1,0–2,5% (zagęszczanych 2x50 uderzeń na stronę próbki – nieznacznie większą wolną przestrzeń powinny wykazywać próbki zagęszczane 2x35 uderzeń na stronę – to będzie informowało o podatności do zagęszczania),
3. duża podatność na zagęszczanie (1-2 przejazdy statyczne walca powinny gwarantować uzyskanie projektowanej wolnej przestrzeni),
4. lepszą efektywność zagęszczania na obiektach mostowych można uzyskać przy stosowaniu walców stalowych z wibracją poziomą (ten rodzaj wibracji można stosować na obiektach mostowych) – pozwoli to również uzyskać lepszą strukturę powierzchni warstwy,
5. znaczna zawartość lepiszcza asfaltowego (polimeroasfaltowego) średniej twardości (temperatura mięknięcia nie może być zbyt wysoka, gdyż może to utrudnić proces zagęszczania

- oraz uzyskanie jednorodnej struktury mieszanki), gwarantująca szczelność mieszanki, jej podatność do zagęszczania oraz odkształceń poziomych (w wyniku różnicowań temperaturowych),
6. grubość warstwy musi być ograniczona ze względu na jej podatność do deformacji lepkoplastycznych do 1,5-3,0 cm (przy tej grubości, odporność na deformacje trwałe powinien zapewnić mieszance rozbudowany szkielet mineralny) – przy mieszankach o uziarnieniu do 11 mm można wbudowywać wyjątkowo warstwy o grubości 4 cm,
 7. wbudowywanie powinno odbywać się całą szerokością płyty obiektu, przerwy technologiczne powinny być usytuowane przy dylatacjach,
 8. w wyjątkowych sytuacjach dopuszcza się szwy zwiększenie ilości szwów technologicznych (poprzecznych), ale należy bardzo dobrze wykonać połączenie (poprzez frezowanie powstałego szwu technologicznego na szerokość ok. 2-3 cm i wypełnienie go masą zalewową),
 9. podczas zagęszczania na powierzchni warstwy powinna pojawić się cienka warstewka wyciśniętego lepiszcza (powłoka),
 10. mieszanka na warstwę ochronną może być wytwarzana z niewielkim dodatkiem tlenku żelaza (1-2%), co nada mieszance kolor brunatny, a tym samym przy wszelkiego rodzaju sfrezowaniach warstwy ścieralnej będzie ona widoczna (tlenek żelaza dodatkowo utwardza lepiszcze asfaltowe – duża powierzchnia właściwa tego dodatku powinna być uwzględniona przy określaniu ilości wypełniacza),
 11. mieszanka mineralno-asfaltowa w obszarze dylatacji powinna na odcinku ok. 20-30 cm być projektowana i wykonana ze specjalistycznej mieszanki, podatnej na oddziaływanie dynamiczne (o dużych możliwościach relaksacyjnych), np. mieszanka szkieletowa, makadamowa (jednofrakcyjna) na asfalcie modyfikowanym gumą,
 12. stan powierzchni, w czasie wbudowywania warstwy ochronnej, powinien podlegać stałej kontroli – wszelkiego rodzaju pęcherze (pojawiające się przede wszystkim przy izolacjach arkuszowych), powinny być natychmiast rozprężane (konieczność usunięcia gazów, np. pary wodnej, rozpuszczalników organicznych itp.) a obszary te powinny być dodatkowo dogęszczone.

Do warstwy ścieralnej nawierzchni mostowej należy stosować mieszanki mineralno-asfaltowe, takie jak do nawierzchni posadowionej na podłożu gruntowym (beton asfaltowy, mieszanka grysowo-mastykowa SMA, mieszanka do cienkich warstw ścieralnych BBTM). Właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych do warstwy ścieralnej powinny odpowiadać Wymaganiom Technicznym WT-2.

6.3 Zalecenia dotyczące układu warstw konstrukcyjnych nawierzchni na obiektach mostowych

W tabl. 6-17 i na rys. 1 przedstawiono wskazówki doboru warstwy gruntującej i warstwy izolacyjnej w zależności od rodzaju pomostu obiektu mostowego. Typowe konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych przedstawiono w tabl. 6-18. Wskazówki doboru rodzaju warstwy ochronnej i ścieralnej oraz grubości tych warstw w zależności od kategorii ruchu przedstawiono w tabl. 6-19.

W tabl. 6-20 do 6-28 przedstawiono zalecane konstrukcje nawierzchni mostowych w zależności od kategorii ruchu, rodzaju pomostu i rodzaju izolacji:

- Tablica 6-20. Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z pomostem betonowym i izolacją arkuszową
- Tablica 6-21. Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z pomostem betonowym i izolacją z masy polimeroasfaltowej
- Tablica 6-22. Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z pomostem betonowym izolacją z asfaltu lanego
- Tablica 6-23. Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z pomostem betonowym izolacją z mieszanki SMA/MA
- Tablica 6-24. Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z pomostem stalowym z izolacją powłokową z żywic
- Tablica 6-25. Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z pomostem stalowym i izolacją arkuszową
- Tablica 6-26. Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z pomostem stalowym izolacją z mieszanki SMA/MA
- Tablica 6-27. Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z pomostem stalowym i izolacją z asfaltu lanego
- Tablica 6-28. Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z pomostem stalowym ortotropowym i izolacją arkuszową; izolacją z żywic epoksydowych/poliuretanowych; izolacją z mieszanki SMA/MA



- izolacja (a)
- warstwa gruntująca (b)
- płyta pomostu

a) Izolacje:

- 1) Izolacje asfaltowe powłokowe:
 - izolacje z asfaltowych mas stosowane na zimno i na gorąco,
 - masy asfaltowo-polimerowe,
- 2) Izolacja powłokowa z żywic epoksydowych
- 3) Izolacja powłokowa z żywic poliuretanowych
- 4) Izolacja asfaltowa arkuszowa
- 5) Izolacje asfaltowe z mastyksu tradycyjnego
- 6) Izolacje asfaltowe z asfaltu lanego
- 7) Izolacje asfaltowe z mastyksu wysokogrysiowego
- 8) Izolacje z zapraw cementowo-polimerowych

b) Warstwa gruntująca

- 1) Asfalt upłynniony
- 2) Środki gruntujące żywiczne
- 3) Asfalty drogowe
- 4) Podłoże niegruntowane
- 5) Emulsja asfaltowa

Rys. 6-1. Warstwy gruntujące i izolacje przeciwwodne na obiektach inżynierskich

Tablica 6-17. Wskazówki doboru warstwy gruntującej i warstwy izolacyjnej

Rodzaj warstwy gruntującej i rodzaju pomostu	Rodzaj izolacji							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Pomost betonowy								
1. Asfalt upłynniony	+	-	-	+	+/-	+/-	+	-
2. Środki gruntujące żywiczne	-	+/- ¹	++	+	+/-	+/-	+/-	-
3. Asfalty drogowe	++	-	-	++	++	++	++	-
4. Podłoże niegruntowane	+/-	+ ¹	+/-	-	+/-	+/-	-	+
5. Emulsje asfaltowe	-	-	-	+ ²	+/-	+/-	+/-	-
Pomost stalowy								
1. Środki gruntujące żywiczne	+/-	++	++	++	+ ³	+ ³	++ ³	-
2. Podłoże niegruntowane (zabezp. antykorozyjne)	-	+	+/-	-	+ ⁴	+ ⁴	++ ⁴	-

„++” bardzo zalecane
 „+” zalecane
 „+/-” dopuszczalne
 „-” niezalecane

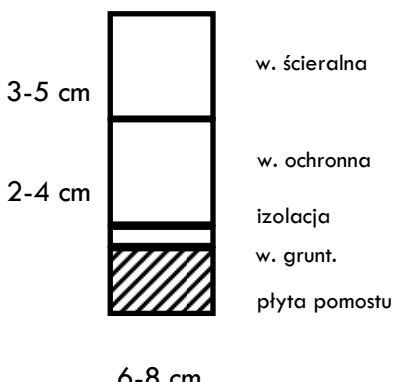
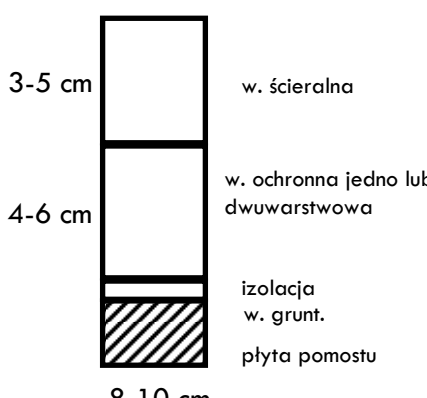
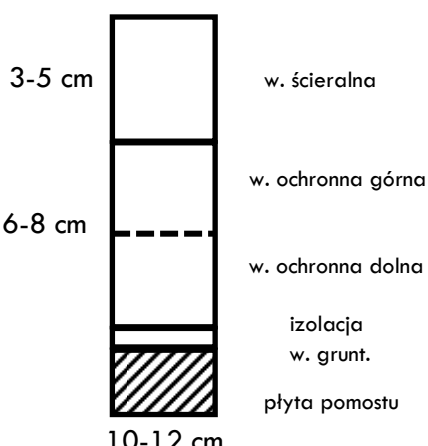
¹ w połączeniu z izolacją arkuszową

² w połączeniu z izolacją z papy wentylowanej

³ w połączeniu z warstwą szczepną bitumiczną

⁴ konieczne zabezpieczenie przeciwpślizgowe (z prętów)

Tablica 6-18. Typowe konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych

Kategoria ruchu	KR1-KR2	KR3-KR4	KR5-KR6
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	Do 0,50	0,50-7,30	>7,30
	 3-5 cm w. ścieralna 2-4 cm w. ochronna izolacja w. grunt. 6-8 cm płyta pomostu	 3-5 cm w. ścieralna 4-6 cm w. ochronna jedno lub dwuwarstwowa izolacja w. grunt. 8-10 cm płyta pomostu	 3-5 cm w. ścieralna 6-8 cm w. ochronna górna w. ochronna dolna izolacja w. grunt. 10-12 cm płyta pomostu

Warstwa ścieralna

- 1 Mieszanka SMA
- 2 Asfalt lany MA
- 3 Beton asfaltowy AC
- 4 Beton asfaltowy do cienkich warstw ścieralnych AC BBTM

Warstwa ochronna

- 1 Mieszanka SMA
- 2 Asfalt lany MA
- 3 Beton asfaltowy AC
- 4 Mieszanka SMA/MA
- 5 Mieszanka HRA

Tablica 6-19. Wskazówki doboru warstw konstrukcyjnych nawierzchni mostowych

Warstwa ścieralna Warstwa ochronna	1. SMA	2. MA	3. AC	4. BBTM
Warstwa ochronna				
1. SMA	+	+/-	+/-	+
2. MA	+	+	+	+
3. AC	+	-	+	+
4. SMA/MA	++	+	+	++
5. HRA	+	+	+	+

„++” bardzo zalecane
 „+” zalecane
 „+/-” dopuszczalne
 „-” niezalecane

Warstwa ścieralna

- 1 Mieszanka SMA
- 2 Asfalt Lany MA
- 3 Beton asfaltowy AC
- 4 Beton asfaltowy do cienkich warstw ścieralnych AC BBTM

Warstwa ochronna

- 1 Mieszanka SMA
- 2 Asfalt lany MA
- 3 Beton asfaltowy AC
- 4 Mieszanka SMA/MA
- 5 Mieszanka HRA

Tablica 6-20.

Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z *pomostem betonowym*
i izolacją arkuszową

Kategoria ruchu	KR1-KR2	KR3-KR4	KR5-KR7
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	Do 0,50	0,50-7,30	>7,30
1	AC 11 S – 4 cm AC 8 – 3 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca plyta pomostu 7 cm + 0,5 cm papa	AC 11 S – 5 cm SMA/MA 8 – 3 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca plyta pomostu 8 cm + 0,5 cm papa	AC 11 S – 5 cm AC 11 – 4 cm SMA 5 – 2 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja w. gruntująca plyta pomostu 11 cm + 0,5 cm papa
2	SMA 8 – 4 cm AC 8 – 3 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca plyta pomostu 7 cm + 0,5 cm papa	SMA 11 – 4 cm SMA/MA 11 – 4 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca plyta pomostu 8 cm + 0,5 cm papa	SMA 11 – 5 cm SMA 11 – 4 cm SMA/MA 5 – 2 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja w. gruntująca plyta pomostu 11 cm + 0,5 cm papa

c.d. tablicy 6-20.

3	AC 8 S – 4 cm MA 8 – 3 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 7 cm + 0,5 cm papa	BBTM 11 – 4 cm MA 8/11 – 4 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 8 cm + 0,5 cm papa	BBTM 11 – 4 cm MA 11 – 4 cm MA 5 – 3 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 11 cm + 0,5 cm papa
---	--	---	---

Tablica 6-21.

Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z *pomostem betonowym*
i izolacją z masy polimeroasfaltowej

Kategoria ruchu	KR1-KR2	KR3-KR4	KR5-KR7
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	Do 0,50	0,50-7,30	>7,30
1	AC 11 – 4 cm AC 8 – 3 cm Masa polimeroasfaltowa gr. ok 3 mm w. ścieralna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 7 cm	AC 11 – 4 cm AC 8 – 3 cm AC 5 – 2 cm Masa polimeroasfaltowa gr. ok 2 mm w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 9 cm	AC 11 – 4 cm AC 11 – 4 cm AC 8 – 3 cm Masa polimeroasfaltowa gr. ok 2 mm w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 11 cm
2	SMA 11 – 4 cm AC 8 – 3 cm Masa polimeroasfaltowa gr. ok 3 mm w. ścieralna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 7 cm	SMA 11 – 4 cm SMA 8 – 3 cm SMA 5 – 2 cm Masa polimeroasfaltowa gr. ok 2 mm w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 9 cm	SMA 11 – 4 cm SMA 11 – 4 cm SMA 8 – 3 cm Masa polimeroasfaltowa gr. ok 2 mm w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 11 cm

c.d. tablicy 6-21.

3	BBTM 11 – 4 cm AC 8 – 3 cm Masa polimeroasfaltowa gr. ok 3 mm w. ścieralna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 7 cm	BBTM 11 – 4 cm AC 8 – 3 cm SMA 5 -2 cm Masa polimeroasfaltowa gr. ok 2 mm w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 9 cm	BBTM 11 – 4 cm AC 8 – 4 cm SMA 8 – 3 cm Masa polimeroasfaltowa gr. ok 2 mm w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 11 cm
---	--	---	--

Tablica 6-22.

Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z *pomostem betonowym*
I izolacją z asfaltu lanego

Kategoria ruchu	KR1-KR2	KR3-KR4	KR5-KR7
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	Do 0,50	0,50-7,30	>7,30
1	MA 11 – 4 cm MA 5 – 3 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe	MA 11 – 5 cm MA 8 – 4 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe	MA 11 – 5 cm MA 8 – 4 cm MA 5 – 3 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe
2	SMA 11 – 4 cm MA 8 – 3 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe	SMA 8 – 4 cm SMA 8 – 4 cm MA 5 -2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe	SMA 11 – 4 cm SMA 11 – 4 cm MA 8 – 3 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe

c.d. tablicy 6-22.

3	AC 11 – 5 cm MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 7 cm	BBTM 11 – 4 cm SMA 5 – 3 cm MA 5 -2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 9 cm	BBTM 11 – 4 cm MA 11 – 4 cm MA 8 – 3 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 11 cm
---	--	---	--

Tablica 6-23.

Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z *pomostem betonowym*
I izolacją z mieszanki SMA/MA

Kategoria ruchu	KR1-KR2	KR3-KR4	KR5-KR7
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	Do 0,50	0,50-7,30	>7,30
1	SMA 8 – 4 cm SMA/MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 6 cm	SMA 11 – 4 cm SMA 8 – 3 cm SMA/MA 8 – 3 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 10 cm	SMA 11 – 4 cm SMA 11 – 4 cm SMA/MA 8 – 3 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 11 cm
2	AC 11 – 5 cm SMA/MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 7 cm	AC 11 – 4 cm AC 11 – 4 cm SMA/MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 10 cm	MA 11 – 4 cm MA 11 – 4 cm SMA/MA 8 – 3 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 11 cm

c.d. tablicy 6-23.

3	MA 8 – 4 cm w. ścieralna izolacja w. gruntująca płyta pomostu SMA/MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe 6 cm	MA 11 – 4 cm MA 8 – 3 cm SMA/MA 8 – 3 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 10 cm	AC 11 – 4 cm AC 16 – 5 cm SMA/MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 11 cm
---	--	---	---

Tablica 6-24.

Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z *pomostem stalowym*
z izolacją powłokową z żywicy

Kategoria ruchu	KR1-KR2	KR3-KR4	KR5-KR7
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	Do 0,50	0,50-7,30	>7,30
1	SMA 8 – 3 cm AC 8 – 3 cm Żywica epoksyd./ poliuretanowa w. ścieralna w. ochronna izolacja + w. gruntująca plyta pomostu 6 cm	SMA 8 – 3 cm AC 8 – 4 cm AC 5 – 2 cm Żywica epoksyd./ poliuretanowa w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja + w. gruntująca plyta pomostu 9 cm	SMA 11 – 4 cm AC 11 – 4 cm SMA 8 – 3 cm Żywica epoksyd./ poliuretanowa w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja + w. gruntująca plyta pomostu 11 cm
2	SMA 8 – 3 cm AC 8 – 3 cm Żywica epoksyd./ poliuretanowa w. ścieralna w. ochronna izolacja + w. gruntująca plyta pomostu 6 cm	SMA 8 – 3 cm AC 8 – 4 cm AC 5 – 2 cm Żywica epoksyd./ poliuretanowa w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja + w. gruntująca plyta pomostu 10 cm	SMA 11 – 4 cm SMA 11 – 4 cm SMA 8 – 3 cm Żywica epoksyd./ poliuretanowa w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja + w. gruntująca plyta pomostu 11 cm

c.d. tablicy 6-24.

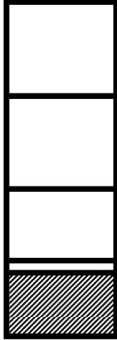
3	SMA 8 – 3 cm MA 8 – 3 cm Żywica epoksyd./ poliuretanowa w. ścieralna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 6 cm	SMA 11 – 4 cm SMA 8 – 3 cm SMA 5 – 2 cm Żywica epoksyd./ poliuretanowa w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 9 cm	BBTM 11 – 4 cm AC 11 – 4 cm SMA 8 – 3 cm Żywica epoksyd./ poliuretanowa w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 11 cm
---	--	--	---

Tablica 6-25.

Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z *pomostem stalowym*
i izolacją arkusową

Kategoria ruchu	KR1-KR2	KR3-KR4	KR5-KR7
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	Do 0,50	0,50-7,30	>7,30
1	AC 11 – 4 cm AC 8 – 3 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca plyta pomostu 7 cm	AC 11 – 4 cm AC 8 – 3 cm AC 5 – 2 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja w. gruntująca plyta pomostu 9 cm	AC 11 – 4 cm AC 11 – 5 cm AC 5 – 3 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja w. gruntująca plyta pomostu 12 cm
2	SMA 8 – 3 cm AC 8 – 4 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca plyta pomostu 7 cm	SMA 11 – 4 cm AC 8 – 3 cm AC 5 – 2 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja w. gruntująca plyta pomostu 9 cm	BBTM 11 – 4 cm AC 11 – 4 cm AC 8 – 3 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja w. gruntująca plyta pomostu 11 cm

c.d. tablicy 6-25.

3	SMA 8 – 3 cm MA 8 – 3 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe  w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 6 cm	SMA 11 – 4 cm SMA 8 – 3 cm SMA 5 – 2 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe  w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 9 cm	SMA 11 – 4 cm SMA 11 – 4 cm SMA 8 – 3 cm Papa – 0,5 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe  w. ścieralna w. ochronna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 11 cm
---	--	---	---

Tablica 6-26.

Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z *pomostem stalowym*
I izolacją z mieszanki SMA/MA

Kategoria ruchu	KR1-KR2	KR3-KR4	KR5-KR7
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	Do 0,50	0,50-7,30	>7,30
1	AC 8 S – 4 cm SMA/MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica	AC 8 S – 3 cm AC 8 – 3 cm SMA/MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica	AC 11 S – 4 cm AC 11 – 4 cm SMA/MA 8 – 3 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica
2	SMA 8 – 3 cm SMA/MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica	SMA 8 – 3 cm SMA 8 – 3 cm SMA/MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica	SMA 11 – 4 cm SMA 11 – 4 cm SMA/MA 8 – 3 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica

c.d. tablicy 6-26.

3	BBTM 8 – 3 cm SMA/MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica w. ścieralna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 5 cm	BBTM 8 – 3 cm AC 8 – 3 cm SMA/MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 8 cm	BBTM 11 – 4 cm AC 11 – 4 cm SMA/MA 8 – 3 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 11 cm
---	--	--	---

Tablica 6-27.

Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z *pomostem stalowym*
i izolacją z asfaltu lanego

Kategoria ruchu	KR1-KR2	KR3-KR4	KR5-KR7
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	Do 0,50	0,50-7,30	>7,30
1	AC 11 – 5 cm MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica w. ścieralna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 7 cm	AC 11 – 4 cm AC 8 – 3 cm MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 9 cm	AC 11 – 4 cm AC 11 – 4 cm MA 8 – 3 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 11 cm
2	SMA 11 – 4 cm MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica w. ścieralna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 6 cm	SMA 8 – 3 cm SMA 8 – 3 cm MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 8 cm	SMA 11 – 4 cm SMA 11 – 4 cm MA 8 – 3 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca płyta pomostu 11 cm

c.d. tablicy 6-27.

3	BBTM 11 – 4 cm MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica w. ścieralna izolacja w. gruntująca plyta pomostu 6 cm	BBTM 8 – 3 cm AC 8 – 3 cm MA 5 – 2 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca plyta pomostu 8 cm	BBTM 11 – 4 cm AC 11 – 4 cm MA 8 – 3 cm Asfalt upłynniony lub lepiszcze asfaltowe lub żywica w. ścieralna w. ochronna izolacja w. gruntująca plyta pomostu 11 cm
---	---	---	---

Tablica 6-28.

Zalecane konstrukcje nawierzchni podatnych na obiektach mostowych z *pomostem stalowym ortotropowym* i izolacją arkusową; izolacją z żywic epoksydowych/poliuretanowych; izolacją z mieszanki SMA/MA

Kategoria ruchu	KR1-KR2; KR3-KR4; KR5-KR7	
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	Do 0,50; 0,50-7,30; >7,30	
1	SMA 11 – 4 cm SMA 5 – 2 cm Papa – 0,5 cm lub żywica epoksyd./poliuretanowa lub SMA/MA – 2 cm w. ściernalna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 6 cm	SMA 11 – 4 cm SMA/MA 5 – 2 cm Papa – 0,5 cm lub żywica epoksyd./poliuretanowa lub SMA/MA – 2 cm w. ściernalna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 6 cm
2	AC 11 – 4 cm SMA 5 – 2 cm Papa – 0,5 cm lub żywica epoksyd./poliuretanowa lub SMA/MA – 2 cm w. ściernalna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 6 cm	AC 11 – 4 cm SMA/MA 5 – 2 cm Papa – 0,5 cm lub żywica epoksyd./poliuretanowa lub SMA/MA – 2 cm w. ściernalna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 6 cm

c.d. tablicy 6-28.

3	BBTM 11 – 3 cm SMA 5 – 2 cm Papa – 0,5 cm lub żywica epoksyd./poliuretanowa lub SMA/MA – 2 cm  w. ścieralna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 5 cm	BBTM 11 – 3 cm SMA/MA 5 – 2 cm Papa – 0,5 cm lub żywica epoksyd./poliuretanowa lub SMA/MA – 2 cm  w. ścieralna w. ochronna izolacja + w. gruntująca płyta pomostu 5 cm
---	--	---

Uwagi do tablic 6-20 do 6-28:

1. W przypadku użycia asfaltów upłynnionych lub emulsji asfaltowych kolejne warstwy konstrukcyjne należy układać po całkowitym odparowaniu wody lub rozpuszczalnika.
2. Podłoże pod izolację powinno być suche i czyste, bez grudek. Zasada dotyczy również powierzchni poszczególnych warstw nawierzchniowych (izolacji, warstwy ochronnej).
3. Przedstawione propozycje konstrukcji nawierzchni z izolacją arkuszową odnoszą się zarówno do izolacji z pap zgrzewalnych, jak i z pap samoprzylepnych, z tym że zastosowanie papy samoprzylepnej wymaga każdorazowo sprawdzenia jej przyczepności do podłoża metodą „Pull-off”.
4. W przypadku stosowania izolacji powłokowych z żywic do kategorii ruchu KR-1 do KR-2 należy stosować posypkę z piasku a do kategorii ruchu KR-3 do KR-7 należy stosować posypkę z drobnego grys. Warstwa ta pełni rolę izolacyjno-szczepną.
5. Do mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych do nawierzchni kategorii ruchu KR-5, KR-6, KR-7 należy stosować wyłącznie lepiszcza modyfikowane.

6. Warstwa SMA 5 o grubości 2 cm usytuowana w dolnej warstwie ochronnej, charakteryzuje się podwyższoną zawartością lepiszcza i pełni funkcję powłoki relaksacyjnej
7. Asfalt lany MA na obiekcie mostowym najlepiej układać całą szerokością jezdni (bez szwów technologicznych).
8. Do asfaltu lanego do warstwy izolacji należy stosować miękki asfalt (50/70) z dodatkiem asfaltu naturalnego, miazgi gumowego lub polimeru, przestrzegając przy tym bezpiecznych temperatur technologicznych, odpowiednich do rodzaju dodatku.
9. W mieszance SMA stosowanej do warstwy ochronnej należy zwiększyć ilość lepiszcza asfaltowego.
10. Mieszanki BBTM stosowane do warstwy ścieralnej nawierzchni obiektu mostowego powinny zawierać od 3 do 5 % wolnych przestrzeni (struktura zamknięta).
11. Przy wbudowywaniu mieszanek mineralno-asfaltowych należy stosować urządzenia typu Shuttle Buggy a w przypadku transportu mieszanek mineralno-asfaltowych powyżej 70 km należy bezwzględnie stosować tego typu urządzenia.

7 WNIOSKI

Na podstawie analizy literatury oraz badań laboratoryjnych można sformułować następujące wnioski końcowe:

1. Nawierzchnia jest elementem mostu decydującym o trwałości obiektu inżynierskiego. Pracuje ona w bardzo specyficznych warunkach obciążenia od ruchu pojazdów samochodowych i czynników klimatycznych.
2. Obciążenia ruchem pojazdów samochodowych wywołują w warstwach nawierzchni mostowej większe naprężenia i odkształcenia niż w warstwach nawierzchni posadowionej na podłożu gruntowym, co przyczynia się to do zmniejszenia trwałości nawierzchni obiektów mostowych.
3. Nawierzchnie mostowe w wyniku działania obciążenia ruchem oraz oddziaływania czynników klimatycznych ulegają zniszczeniom, przede wszystkim: spękanom powstałym w wyniku skurczu termicznego lub powtarzalnych obciążeń, odkształceniom trwałym powstałym w wyniku odkształcenia lepko-plastycznego asfaltowych warstw nawierzchni, pęknięciu połączenia w wyniku odspojenia się warstwy lub warstw nawierzchni, tworzeniem się pęcherzy w postaci miejscowych wypukłości powstałych na skutek oderwania się warstwy lub warstw nawierzchni, lub też izolacji od podłoża, pod wpływem ciśnienia pary wodnej lub innych gazów.
4. Zniszczenia powstałe w warstwach nawierzchni mostowej mogą powodować uszkodzenie hydroizolacji w postaci utraty częściowej lub całkowitej przyczepności do podłoża, utraty szczepności między izolacją a warstwą ochronną, wzrostu nasiąkliwości izolacji, uszkodzeń izolacji w wyniku pęknięcia, przebicia, utraty szczelności i w rezultacie korozji pomostu.
5. Ograniczenie zawarte w Wymaganiach Technicznych WT-2: 2010, dotyczące stosowania do warstwy ochronnej nawierzchni mostowych, tylko asfaltu lanego MA 8 i MA 11, jest niewłaściwym. Należy wprowadzać do stosowania w ramach warstwy ochronnej nowe rozwiązania materiałowo-technologiczne, takie jak np. mastyksy wysokogrysowe SMA/MA.
6. Wysokie temperatury technologiczne w różny sposób wpływają na właściwości lepiszczy asfaltowych stosowanych do nawierzchni mostowych. Asfalty drogowe rodzaju 50/70, 35/50 i 20/30 pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury wykazują nieznaczne zmiany właściwości, natomiast polimeroasfalty w temperaturze powyżej 250°C wykazują bardzo duże zmiany spowodowane zniszczeniem struktury polimeru.
7. Dodatek asfaltu naturalnego do asfaltów drogowych wpływa korzystnie na właściwości techniczne asfaltów drogowych, w tym na zwiększenie odporności asfaltów na wysoką temperaturę (do temperatury 300°C). Asfalty drogowe osiągają najkorzystniejsze właściwości przy dodatku 2% asfaltu naturalnego.
8. Wyniki badania giętkości pap zgrzewalnych wykazały ich brak odporności na działanie wysokiej temperatury w wyniku przegrzania. Papy po wygrzewaniu już w temperaturze 200°C ulegają zniszczeniom. Papy wygrzewane w temperaturze 250 i 300°C po badaniu giętkości w temperaturze -30°C wykazują pęknięcia na całej grubości masy powłokowej i osnowy. Dlatego zaleca się unikanie przegrzania papy podczas jej układania oraz ograniczenie oddziaływania wysokiej temperatury od układanej mieszanki w warstwie ochronnej.
9. Mastyksy tradycyjne, mastyksy wysokogrysowe SMA/MA i asfalty lane z lepiszczami modyfikowanymi do warstwy izolacji, są odporne na działanie wysokiej temperatury technologicznej w zakresie 200 - 250°C. Temperaturę 250°C należy uznać za temperaturę graniczną, powyżej której indeks zmiany właściwości tych mieszanek wyraźnie wzrasta. Mieszanka SMA/MA z lepiszczem gumowo-asfaltowym jest bardziej odporna na zmiany właściwości niż mieszanka z polimeroasfaltem.
10. Wysoka temperatura wygrzewania mieszanek mineralno-asfaltowych do warstwy ochronnej i ścieralnej w najmniejszym stopniu powoduje zmniejszenie trwałości zmęczeniowej mieszanki SMA/MA, w następnej kolejności mieszanki SMA i betonu asfaltowego AC. Przy amplitudzie odkształcenia $\varepsilon = 300\mu\text{m/m}$ trwałość zmęczeniowa mieszanki SMA jest około 10 razy, a mieszanki SMA/MA około 40 razy większa niż trwałość betonu asfaltowego.

11. Mieszanki mineralno-asfaltowe do warstwy izolacyjnej, ochronnej i ścieralnej (mastyks tradycyjny, asfalt lany, mastyks wysokogrysowy SMA/MA, mieszanka SMA, beton asfaltowy AC) wykazują dużą odporność na starzenie technologiczne, szczególnie mieszanki z lepiszczem polimerowym i lepiszczem gumowo-asfaltowym. Największą odpornością na starzenie charakteryzują się mieszanki asfaltu lanego i grysowo-mastyksowe SMA i SMA/MA.
12. Mieszanki mineralno-asfaltowe do warstwy ochronnej i ścieralnej (asfalt lany, mastyks wysokogrysowy SMA/MA, mieszanka SMA, beton asfaltowy AC) wykazują dużą odporność na starzenie eksploatacyjne. Największą odpornością na starzenie eksploatacyjne charakteryzuje się mastyks wysokogrysowy SMA/MA.
13. Ze względu na odporność na działanie wody mieszanki mineralno-asfaltowe do warstwy ochronnej i ścieralnej (asfalt lany, mastyks wysokogrysowy SMA/MA, mieszanka SMA, beton asfaltowy AC) spełniają wymaganie na poziomie 90% wskaźnika ITSr.
14. Pod względem odporności na zmęczenie mieszanki mineralno-asfaltowe do warstwy ochronnej i ścieralnej można uszeregować od najniższej trwałości zmęczeniowej do najwyższej trwałości zmęczeniowej, zgodnie z następującą kolejnością: beton asfaltowy, mieszanka grysowo-mastykowa SMA, mieszanka grysowo-mastykowa SMA/MA. Przy amplitudzie odkształcenia $\varepsilon = 300\mu\text{m/m}$ trwałość zmęczeniowa mieszanki SMA jest około 4 razy, a mieszanki SMA/MA około 20 razy większa niż trwałość betonu asfaltowego.
15. Przedstawione zalecane, przykładowe konstrukcje nawierzchni obiektów mostowych, z zastosowaniem nowych rozwiązań materiałowo-technologicznych, w zależności od kategorii ruchu, rodzaju pomostu i rodzaju izolacji spełniają wymagania nawierzchni mostowych, trwałych i odpornych na działanie ruchu samochodowego i środowiska.

8 LITERATURA

- [1] Hulsey J. L., Yang L., and Raad L.: Wearing Surfaces for Orthotropic Steel Bridge Decks, TRR Record 1654, Paper No. 99-1049, Transportation Research Board, Washington DC, 1999.
- [2] Bocci E. and Canestrari F.: Analysis of Structural Compatibility at Interface Between Asphalt Concrete Pavements and Orthotropic Steel Deck Surfaces. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Volume 2293 / 2012 Asphalt Materials and Mixtures 2012, Vol. 1.
- [3] Piłat J., Radziszewski P., Kowalski K.: Nawierzchnie asfaltowe i betonowe na obiektach mostowych. Seminarium „Nawierzchnie, izolacje i inne elementy wyposażenia mostów” Warszawa 2007, str. 49-52.
- [4] Sprinkel M. M. and Apeagyei A. K.: Evaluation of the Installation and Initial Condition of Overlays on Bridge Decks Rosphalt. Virginia Center for Transportation Innovation and Research. Final Report VCTIR 13-R5. June 2013.
- [5] Hicks, R. Gary et. al.: Asphalt Surfaces on Steel Bridge Decks, TRR Record 1740, Paper No. 00-0389, Transportation Research Board, Washington DC, 2000.
- [6] Piłat J., Radziszewski P.: Nawierzchnie asfaltowe, WKŁ, Warszawa 2010.
- [7] Nowości Zagranicznej Techniki Drogowej nr 120/94 str. 29-42 „Asfalt w warstwach izolacyjnych na obiektach inżynierskich (mostach i wiaduktach)”. Opracowanie mgr inż. Bolesława Majewskiego.
- [8] Katalog Zabezpieczeń Powierzchniowych Drogowych Obiektów Inżynierskich. IBDiM, Warszawa 2002.
- [9] Kwapiński M.: Co powoduje, że nawierzchnie mostów w Danii są takie trwałe? - opracowanie na podstawie artykułu Vibeke Wegan: „Bridge pavements – what makes them long-lasting?” Nowości Zagranicznej Techniki Drogowej, Issue 142/2000 pages 89-94.
- [10] Danowski M.: Doświadczenia z izolacjami i nawierzchniami na obiektach mostowych - opracowanie na podstawie artykułu Hermann W. Fritc i Sivotha Hean: „Erfahrungen mit Brückenabdichtungen und Brückenbelägen.” Nowości Zagranicznej Techniki Drogowej Nr 141/2000 pages 85-104.
- [11] Mieczkowski P.: Izolacje z pap asfaltowych na obiektach mostowych. Izolacje 2/2010.
- [12] Nowości Zagranicznej Techniki Drogowej Nr 72/78
- [13] Zalecenia wykonywania cienkich warstw ściernych „na gorąco” bitumicznych nawierzchni drogowych. IBDiM Informacje, Instrukcje, Zeszyt nr 50. Warszawa 1995.
- [14] Zasady wykonywania nawierzchni asfaltowej o zwiększonej odporności na koleinowanie i zmęczenie. IBDiM Informacje, Instrukcje, Zeszyt nr 63. Warszawa 2002.
- [15] Zasady wykonywania nawierzchni z mieszanki mineralno-asfaltowej o nieciągłym uziarnieniu. IBDiM Informacje-Instrukcje, Zeszyt nr 50. Warszawa 1995.
- [16] Sybilski D.: Długowieczne nawierzchnie asfaltowe w świecie i w Polsce. Drogownictwo nr 3, 2004

- [17] Al-Qadi I.L., Lahouar S., Jiang K., McGhee K.K., Mokarem D.: Bridge Deck Reinforcing Steel Cover Depth Prediction Using GPR, proceedings of the 85th Transportation Research Board annual meeting, Washington, D.C., 2006.
- [18] Procedura IBDiM Nr PB-TM-X3 Badanie przyczepności powłoki ochronnej do betonu metodą „pull-off”.
- [19] Procedura IBDiM Nr PB-TM-X4 Oznaczenie przyczepności powłoki ochronnej do stali metodą „pull-off”.
- [20] Sybilski D.: Bitumiczne nawierzchnie mostowe. Drogownictwo nr 9, 1994.
- [21] Piber H.: Den Spurrinen auf der Spur. Die Asphaltstrasse 6, 1993.
- [22] Koba H., Skotnicki Ł., Szydło A.: Laboratory Evaluation of Asphalt Rubber Mastic Prepared Using Mixed (wet + dry) Method. Proceedings “Asphalt Rubber 2012” Conference, Munich, Germany, October 2012.
- [23] Weil, Gary J.: Non Destructive Testing of Bridge, Highway and Airport Pavements, Gateway Engineer Magazine, pages 5-7, (1992).
- [24] Bakht, B. and Jaeger, L.: "Bridge Testing—A Surprise Every Time." Journal of Structural Engineering, 116(5), 1370–1383, (1990).
- [25] Kwaśniewski L., Wekezer J., Roufa C., Li H., Ducher J., Malachowski J.: Experimental evaluation of dynamic effects for a selected highway bridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, vol. 20, no. 3, pp. 253-260, (2006).
- [26] Livermore Software Technology Corporation (LSTC) “LS-DYNA Keyword User's Manual”, LSTC, 2012.
- [27] WIELTON S.A., strona internetowa www.wielton.com.pl.
- [28] IVECO, Truck partner, strona internetowa www.truckpartner.iveco.pl.
- [29] Szurgott P., Kwasniewski L., Wekezer J.: Experimental Validation of a Finite Element Model of a Heavy Vehicle. MES 2009, XI Conference "FEM in Support of Analysis, Design and Manufacturing. Poland. October 2009.
- [30] Szurgott P., Kwasniewski L., Wekezer J.W.: Example of Experimental Validation and Calibration of a Finite Element Model of a Heavy Vehicle, Journal of KONES Powertrain and Transport, vol. 17, no. 1, pp. 433-440, (2010).
- [31] Malachowski J., Li H., Wekezer J., Kwaśniewski L.: Numerical Assessment of Dynamic Response of Highway Bridges Subjected to Heavy Vehicles, Advances in Transportation Studies, An International Journal. Issue XII, July 2007, Section B, pp. 47-58.
- [32] Nagórska M.: Wyznaczanie deformacji i naprężeń statycznych konstrukcji nawierzchni drogowej przy wykorzystaniu MES za pomocą programu ABAQUS, Praca Dyplomowa Inżynierska, Instytut Dróg i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska, Warszawa, wrzesień 2010.
- [33] Przebudowa/remont mostu przez rzekę Biebrzę K/M Sztabin na drodze krajowej nr 8 w km 706+634. Dokumentacja projektowa. GDDKiA o. w Białymstoku 2011.

- [34] Most Gen. Stefana-Grota Roweckiego – dokumentacja projektowa remontu i modernizacji.
- [35] Gawęł I., Kalabińska M., Piłat J.: Asfalty drogowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2001.
- [36] Danowski M.: Nawierzchnie z dodatkiem asfaltu naturalnego Trynidad. Nawierzchnie asfaltowe 2/2009, str. 7-13.
- [37] Stosch H. J.: Błędy wykonawstwa nawierzchni bitumicznych. WKŁ. Warszawa 1977.
- [38] Germaniuk K., Sybilski D.: Zeszyt 68 „Zalecenia wykonywania izolacji z pap zgrzewalnych i nawierzchni asfaltowych na drogowych obiektach mostowych” IBDiM 2005.
- [39] Germaniuk K.: Zeszyt 74 „Polimeroasfaltowe papy zgrzewalne i samoprzylepne przeznaczone do wykonywania izolacji przeciwwodnych na drogowych i kolejowych obiektach inżynierskich. Zalecenia IBDiM do udzielania aprobat technicznych nr Z/96-03-001” IBDiM 2008.
- [40] Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/1 „Badanie grubości arkusza”.
- [41] Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/2 „badanie grubości warstwy izolacyjnej pod osnową papy”.
- [42] Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/3 „Badanie przesiąkliwości papy”.
- [43] Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/4 „Badanie siły zrywającej przy rozdzieraniu”.
- [44] Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/9 „Badanie wytrzymałości na ścinanie styków arkusza papy”.
- [45] Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/5 „Pomiar przyczepności izolacji do podłoża przez odrywanie (metoda „pull-off”)”.
- [46] Radziszewski P.: Zmiany właściwości lepkością lepkości modyfikowanych i mieszanek mineralno-asfaltowych w wyniku procesu starzenia. Rozprawy Naukowe Nr 142. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej. Białystok 2007.

Normy i dokumenty techniczne

- [N1] WT-2: 2010 „Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania techniczne”
- [N2] PN-EN 12591:2010 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Wymagania dla asfaltów drogowych”
- [N3] PN-EN 14023:2011 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Zasady klasyfikacji asfaltów modyfikowanych polimerami”
- [N4] PN-EN 1426:2009 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie penetracji igłą”
- [N5] PN-EN 1427:2009 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie temperatury mięknięcia - Metoda Pierścienia i Kula”
- [N6] PN-EN 13302:2011 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie lepkości dynamicznej lepiszczy asfaltowych lepkościomierzem obrotowym”
- [N7] PN-EN 1109:2013 pkt 9.1. „Elastyczne wyroby wodochronne - Wyroby asfaltowe do izolacji wodochronnej dachów - Określanie giętkości w niskiej temperaturze”
- [N8] PN-EN 13108-6:2008 „Mieszanki mineralno-asfaltowe - Wymagania - Część 6: Asfalt lany”
- [N9] PN-EN 13108-20:2008 (D.5.1) „Mieszanki mineralno-asfaltowe - Wymagania - Część 20: Badanie typu”
- [N10] PN-EN 933-1:2012 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania”
- [N11] WT-1:2010 „Kruszywa do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach krajowych”
- [N12] PN-EN 1097-6:2013 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw”. Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości”
- [N13] PN-EN 1097-7:2008 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna”
- [N14] 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)”
- [N15] PN-EN 12697-26:2012 „Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 26: Sztywność”
- [N16] PN-EN 12697-5:2010 „Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 5: Oznaczanie gęstości”
- [N17] PN-EN 12697-6:2012 „Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 6: Oznaczanie gęstości objętościowej próbek mieszanki mineralno-asfaltowej”
- [N18] PN-EN 12697-8:2005 „Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 8: Oznaczanie zawartości wolnej przestrzeni”
- [N19] WT-2:2013 „Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania techniczne”
- [N20] PN-64/S-96032: „Drogi samochodowe. Nawierzchnie z asfaltu lanego”

- [N21] BN-70/8934-10 „Drogi samochodowe. Typowe nawierzchnie asfaltowe na mostach drogowych”
- [N22] PN-S-96025:2000 Drogi samochodowe i lotniskowe - Nawierzchnie asfaltowe - Wymagania
- [N23] WT-2 z 2008 „Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania techniczne”
- [N24] PN-EN 13108-5:2008 „Mieszanki mineralno-asfaltowe – Wymagania - Część 5: Mieszanka SMA”
- [N25] PN-EN 12697-12:2008 „Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 12: Określanie wrażliwości próbek asfaltowych na wodę”
- [N26] PN-EN 12697-23:2009 „Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 23: Oznaczanie wytrzymałości mieszanki mineralno-asfaltowej na rozciąganie pośrednie”
- [N27] PN-EN 12697-24 „Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 24: Odporność na zmęczenie”
- [N28] PN-EN 13108-1:2008 „Mieszanki mineralno-asfaltowe - Wymagania - Część 1: Beton asfaltowy”
- [N29] PN-EN 12607-1:2009P „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie odporności na starzenie pod wpływem ciepła i powietrza - Część 1: Metoda RTFOT”
- [N30] PN-EN 14769:2012E „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Przyspieszone starzenie długoterminowe/kondycjonowanie w komorze starzenia ciśnieniowego (PAV)”
- [N31] BN-64/0538-02 „Oznaczenie składu grupowego asfaltów”
- [N32] PN-EN 12593:2009 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie temperatury łamliwości metodą Fraassa”
- [N33] PN-EN 14771:2012 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie sztywności pełzania przy zginaniu - Reometr zginanej belki (BBR)”
- [N34] PN-EN 14770:2012 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie zespolonego modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego - Reometr dynamicznego ścinania (DSR)”
- [N35] PN-EN 13589:2011 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie siły rozciągania asfaltów modyfikowanych, metoda z duktylometrem”
- [N36] PN-EN 13703:2009 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie energii odkształcenia”
- [N37] PN-EN 13398:2012 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie nawrotu sprężystego asfaltów modyfikowanych”
- [N38] PN-EN 13399:2012 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie stabilności podczas magazynowania asfaltów modyfikowanych”
- [N39] PN-EN 12311-1:2001 „Elastyczne wyroby wodochronne - Część 1: Wyroby asfaltowe do izolacji wodochronnej dachów - Określanie właściwości mechanicznych przy rozciąganiu”
- [N40] PN-EN ISO 2592:2001 „Oznaczanie temperatury zapłonu i palenia - Metoda otwartego tygla Clevelanda”
- [N41] PN-EN 12592:2009P „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie rozpuszczalności”

- [N42] PN-EN 12596:2009P „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie lepkości dynamicznej metodą próżniowej kapilary”
- [N43] PN-EN 12595:2009P „Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie lepkości kinematycznej”
- [N44] PN-B-04615:1990 „Papy asfaltowe i smołowe - Metody badań”
- [N45] PN-EN 13416:2004 „Elastyczne wyroby wodoszczelne - Wyroby asfaltowe, z tworzyw sztucznych i kauczuku do izolacji wodoszczelnej dachów - Zasady pobierania próbek”
- [N46] PN-EN 1850-1:2002 „Elastyczne wyroby wodoszczelne - Określanie wad widocznych -- Część 1: Wyroby asfaltowe do izolacji wodoszczelnej dachów”