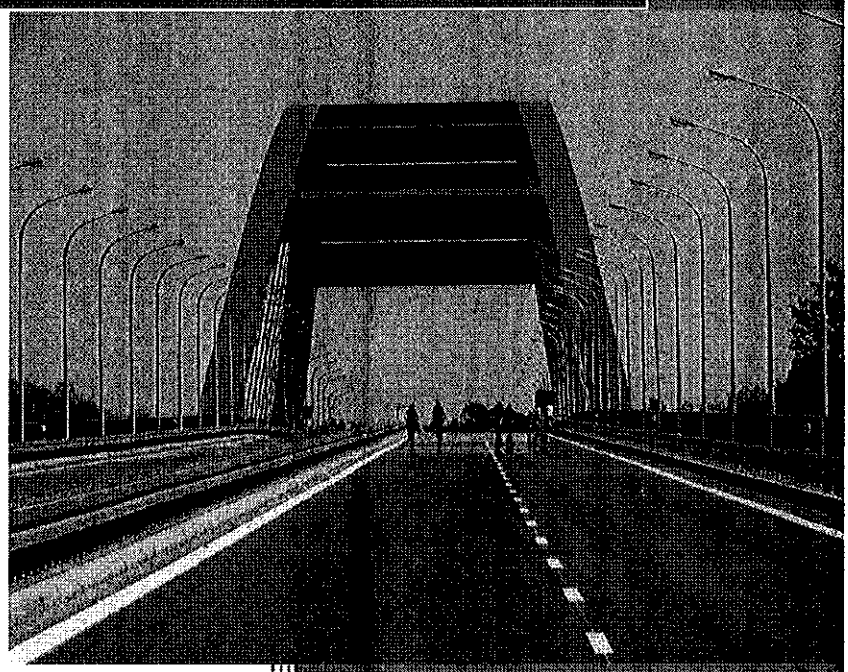
POLITECHNIKA WARSZAWSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
Instytut Dróg i Mostów
Zespół Technologii Materiałów i Nawierzchni Drogowych

ZTMiND

2012

„Rozwiązania materiałowo-technologiczne izolacji i nawierzchni obiektów mostowych"

Raport zbiorczy z zadań 1-4



Zleceniodawca:

Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad

ul. Żelazna 59

Warszawa

Warszawa, grudzień 2012

Wykonawcy:

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

Współpraca badawcza:

Dr inż. Barbara Francke (ITB)

Dr hab. inż. Lesław Kwaśniewski prof. PW

Dr hab. inż. Artur Zbiciak prof. PW

Mgr inż. Rafał Michalczyk (PW)

Inż. Marcin Balcerzak (student PW)

Michał Gleba (student PW)

Krzysztof Rusiniak (student PW)

Inż. Jacek Jabłoński (student PW)

Spis treści

ZAKRES I CEL PRACY **5**

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 **6**

1.1 Konstrukcja nawierzchni na drogowych obiektach mostowych 6

1.2 Rozwiązania materiałowo-technologiczne izolacji mostowych 8

1.3 Rozwiązania materiałowo-technologiczne warstw nawierzchni mostowych 11

2 ANALIZA SZCZEGÓLNYCH WARUNKÓW PRACY IZOLACJI I KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI MOSTOWYCH **13**

2.1 Ogólna charakterystyka szczególnych warunków pracy nawierzchni mostowej 13

LITERATURA **14**

2.2 Analiza stanu naprężeń i odkształceń konstrukcji nawierzchni mostowej 16

Analiza numeryczna konstrukcji nawierzchni mostowej 16

2.2.1 Wprowadzenie 16

2.2.2 Zakres pracy 16

2.2.3 Opracowanie modeli numerycznych 17

Specyfikacja rzeczywistego pojazdu ciężarowego 17

Model MES pojazdu 19

Specyfikacja wybranego mostu 21

Model MES mostu 22

Model MES nawierzchni na naziomie 25

Submodelling 26

Nawierzchnia na obiekcie mostowym 26

Nawierzchnia na naziomie 28

2.2.4 Opracowanie modeli mieszanek mineralno-asfaltowych 29

Wprowadzenie 29

Metoda 29

Opisywanie mieszanki – wyniki doświadczalne 29

Opis materiału zaimplementowanego w programie Ls-Dyna 31

Procedura doboru parametrów modelu 32

Dobrane parametry modelu 33

Testy materiałowe 34

Dziedzina częstotliwości 35

Relaksacja naprężeń 37

2.2.5 Wyniki obliczeń 38

Wpływ stopnia sczepności 38

Porównanie z nawierzchnią na naziomie 46

2.2.6 Podsumowanie 53

PODZIĘKOWANIE **53**

LITERATURA **53**

3 CHARAKTERYSTYKA PODSTAWOWYCH RODZAJÓW ZNISZCZEŃ IZOLACJI I NAWIERZCHNI MOSTOWEJ ORAZ ANALIZA PRZYCZYN ICH POWSTAWANIA **55**

3.1 Charakterystyka szczególnych warunków pracy izolacji i nawierzchni mostowej w aspekcie możliwości powstawania zniszczeń 55

3.2 Analiza zniszczeń nawierzchni na przykładzie wybranych obiektów mostowych.....55
3.2.1 Most w Sztabinie na drodze krajowej nr 8.....55
3.2.2 Kładka nad Kanałem Augustowskim w Augustowie na drodze krajowej nr 8.....60
3.2.3 Most gen. Stefana Grota-Roweckiego.....62

4 OCENA WPŁYWU ODDZIAŁYWANIA TEMPERATURY TECHNOLOGICZNEJ NA TRWAŁOŚĆ MATERIAŁÓW STOSOWANYCH DO WARSTW IZOLACJI I WARSTW NAWIERZCHNI.....69

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.....69
4.1.1 Wymagania i klasyfikacja lepiszczy asfaltowych wg europejskich wymagań (EN) z uwzględnieniem szczególnych warunków krajowych.....69
4.1.2 Materiały do badań.....73
4.1.3 Program badań lepiszczy.....75
4.1.4 Wyniki badań lepiszczy.....76
4.2 Badania odporności papy stosowanej do wykonywania izolacji mostowej na oddziaływanie wysokiej temperatury technologicznej.....91
4.2.1 Wymagania odnośnie asfaltowych pap zgrzewalnych.....91
4.2.2 Materiały do badań.....92
4.2.3 Program badań pap zgrzewalnych.....92
4.2.4 Wyniki badań pap zgrzewalnych.....92
4.3 Badanie odporności na wysokie temperatury technologiczne izolacji z mastyksu tradycyjnego.....99
4.3.1 Materiały.....99
4.3.2 Badania materiałów kamiennych – uziarnienie.....99
4.3.3 Badania materiałów kamiennych – gęstość.....100
4.3.4 Ustalenie składu mieszanki mineralno-asfaltowej typu mastyks izolacyjny (tradycyjny).....100
4.3.5 Program badań mastyksu izolacyjnego.....100
4.3.6 Wyniki badań mastyksu izolacyjnego.....101

LITERATURA.....107

PODSUMOWANIE, WNIOSKI.....107

Rozwiązania materiałowo-technologiczne izolacji i nawierzchni obiektów mostowych

RAPORT ZBIORCZY Z ZADAŃ 1-4

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 roku 2011 i 2012 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

Głównym wykonawcą projektu jest Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Zespół Technologii Materiałów i Nawierzchni Drogowych. Badania giętkości mostowych pap termozgrzewalnych przeprowadzono w Instytucie Techniki Budowlanej w Warszawie.

W opracowaniu Raportu, w ramach współpracy badawczej wzięli udział:

w zadaniu 2, punkt 2.2. Zespół Profesora PW Lesława Kwaśniewskiego z Zakładu Mechaniki Teoretycznej, Wydział IL PW;

w zadaniu 4, punkt 4.2. Dr inż. Barbara Francke z Zakładu Materiałów Budowlanych Instytutu Techniki Budowlanej.

Niniejsze opracowanie dotyczy zadań od 1 do 4 realizowanych w latach 2011, 2012. Praca będzie kontynuowana w roku 2013, w ramach której zostaną zrealizowane punkty 5 do 7.

Ostateczne wnioski badawcze zostaną sformułowane po zakończeniu wszystkich zadań projektu i zostaną zamieszczone w raporcie końcowym.

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

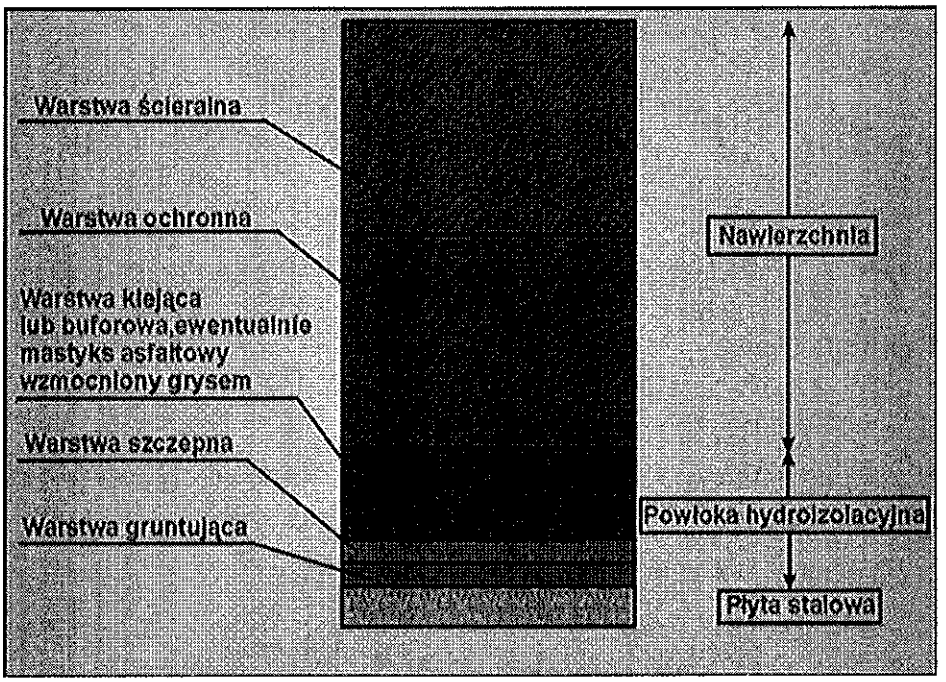
Nawierzchnia jest elementem mostu decydującym w dużej mierze o trwałości obiektu inżynierskiego. Pracuje ona w bardzo specyficznych warunkach obciążenia. Nawierzchnia mostowa poddawana jest obciążeniom od ruchu pojazdów samochodowych i czynników klimatycznych. Według nawierzchnia mostowa powinna spełniać 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 ^{0}C do +60 ^{0}C oraz działaniem obciążeń,
- być równa i szorstka,
- być odporna na ścieranie, spękania niskotemperaturowe i zmęczeniowe oraz na powstawanie kolein.

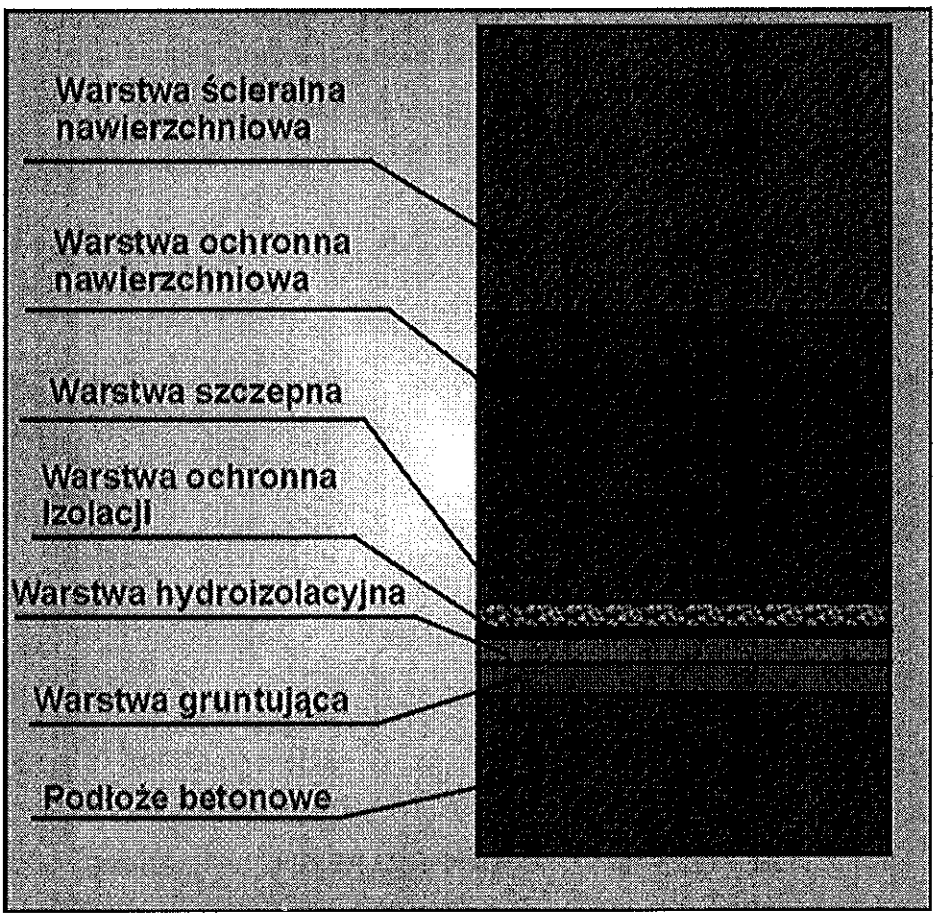
Do zadań nawierzchni na obiekcie inżynierskim należy, oprócz zapewnienia dogodnych i bezpiecznych warunków poruszania się pojazdów, również ochrona pomostu przed działaniem wody i środków odladzających.

Na drogowych obiektach mostowych w Polsce i w większości krajów europejskich wykonuje się nawierzchnie w technologii asfaltowej. W USA większość konstrukcji mostowych są to konstrukcje żelbetowe o nawierzchni betonowej.

Schemat układu warstw konstrukcyjnych nawierzchni asfaltowych na drogowych obiektach mostowych na pomoście stalowym i betonowym przedstawiono na rys. 1-1 i rys. 1-2.



Rys.1-1. Układ warstw konstrukcji nawierzchni na stalowym pomoście



Rys.1-2. Układ warstw konstrukcji nawierzchni na betonowym pomoście

Nawierzchnia asfaltowa układana na hydroizolacji 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.

1.2 Rozwiązania materiałowo-technologiczne izolacji mostowych

Izolacja przeciwwodna (hydroizolacja) jest to cienka warstwa odpowiednio wytrzymałego materiału, nienasiąkliwa, nieprzepuszczalna dla wody, układana na powierzchniach poziomych i pionowych drogowych obiektów inżynierskich [katalog zabezpieczeń]. 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 ^{0}C do +70 ^{0}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.

Materiały stosowane do zabezpieczeń przeciwwodnych obiektów mostowych przedstawiono na rys. 1-3.

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

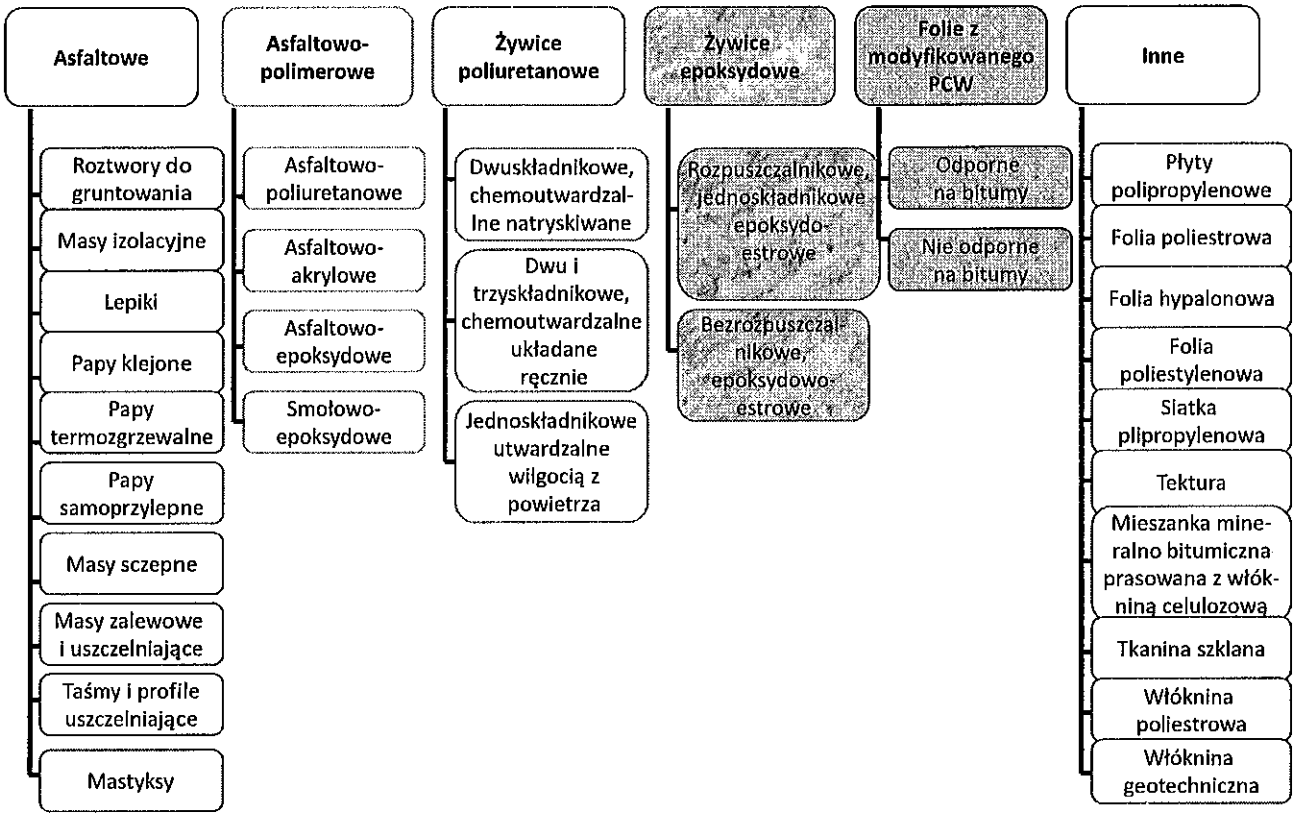
- papy zgrzewalne,
- papy samoprzylepne.

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 powłokowej 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. 1-3.



Rys. 1-3. Materiały stosowane do hydroizolacji pomostów

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

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), środki gruntujące żywiczne do gruntowania podłoży betonowych i stalowych. Roboty izolacyjne powinny być wykonywane bardzo starannie przez wyspecjalizowane brygady dysponujące doświadczeniem oraz odpowiednim sprzętem.

Z doświadczeń krajowych i zagranicznych 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),
- 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. Izolacje z mastyksu wykonuje się wyłącznie na poziomych powierzchniach mostów drogowych, ale przede wszystkim na pomostach stalowych oraz betonowych gdzie nie występuje możliwość zarysowania podłoża. 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. Jednak izolacja z asfaltu piaskowego nie jest tak szczelna jak izolacja z mastyksu ponieważ zawartość wolnych przestrzeni w mieszance 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 przemarznięte, temperatura powietrza obiektu powinna być powyżej 8^0C i nie wyżej od 30^0C, 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 sczepnej,

- 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 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. Stosowany jest układ 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.

Według wymagań technicznych WT – 2: 2010 do warstw nawierzchni mostowej zaleca się stosowanie następujących mieszanek mineralno-asfaltowych:

- do warstwy ochronnej: asfalt lany MA 8, MA 11,

- do warstwy ścieralnej: asfalt lany MA 8, MA 11, mastyks grysowy SMA 5, SMA 8, SMA 11, beton asfaltowy do bardzo cienkich warstw BBTM 8, BBTM 11, beton asfaltowy AC 11.

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 4 cm. Dobrym rozwiązaniem jest stosowanie warstwy ścieralnej o zmniejszone grubości do 2 cm, np. z mieszanki o nieciągłym 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. Najdalej posuniętym rozwiązaniem w zakresie zmniejszenia grubości nawierzchni jest stosowanie izolacjonawierzchni o grubości kilku milimetrów.

Trwałe i bezpieczne nawierzchnie mostowe wymagają właściwego doboru materiałów, odpowiedniej technologii i wykonawstwa na najwyższym poziomie. Można to osiągnąć między innymi stosując lepiszcza modyfikowane, nowe technologie takie jak: mastyks grysowy SMA, asfalty lane z lepiszczami modyfikowanymi o zwiększonej odporności na odkształcenia trwałe, cienkie warstwy o

nieciągłym uziarnieniu BBTM oraz inne nowe rozwiązania materiałowo-technologiczne izolacji i nawierzchni z lepiszczami polimerowymi.

Porównując 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:

- 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 Slamp Concrete) z dużą zawartością cementu (około 470 kg/m^3 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 dodatkowych warstw mostowych.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że podstawą uzyskania trwałych nawierzchni mostowych jest rygorystyczne przestrzeganie technologii wykonania warstw konstrukcyjnych nawierzchni oraz izolacji i zapewnienie dobrych połączeń międzywarstwowych między nimi.

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.

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. 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 utratą połączenia izolacji z pomostem i nawierzchni z izolacją skutkująca gwałtownym zmniejszeniem trwałości nawierzchni.

Duże naprężenia ściskające od obciążeń od pojazdów na mostowych nawierzchniach asfaltowych mogą powodować płynięcie materiału lepkospsprężystego 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 ^{0}C (przy temperaturze powietrza wynosi 35 ^{0}C. 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 oddziaływają 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.

LITERATURA

[1] Adesiyun A., Izolacjo-nawierzchnie na obiektach mostowych, Seminarium Nawierzchnie, izolacje i inne elementy wyposażenia mostów, Warszawa, 18 stycznia 2007, s. 31-44.

[2] Alama K., Nawierzchnia z asfaltu lanego na wiadukcie Brunsbuttel (RFN), Nowości Zagranicznej Techniki Drogowej, 85/1986, 13-20.

[3] Alexandrowicz M., Gutowski T., Hydroizolacje płyt mosowych – przykłady rozwiązań materiałowo-technologicznych SIKA, Seminarium Nawierzchnie, izolacje i inne elementy wyposażenia mostów, Warszawa, 18 stycznia 2007, s. 45-50.

[4] Biliszczuk J., Onysyk J., Wpływ systemu odwodnienia na trwałość drogowych obiektów mostowych, Inżynieria ii budownictwo, nr 1/96, s. 27-31.

[5] Danowski M.., Doświadczenia z izolacjami i nawierzchniami na obiektach mostowych, Nowości Zagranicznej Techniki Drogowej, 141/2000, s. 85-104.

[6] Deska R., Asfalt twardolany jako warstwa ochronna izolacji i nawierzchnia na mostach, Seminarium Nawierzchnie, izolacje i inne elementy wyposażenia mostów, Warszawa, 18 stycznia 2007, s. 23-30.

[7] Germaniuk K., Gajda T., Servidek-Servipak – układana na zimno izolacja przeciwwodna pomostów obiektów mostowych, Seminarium Nawierzchnie, izolacje i inne elementy wyposażenia mostów, Warszawa, 18 stycznia 2007, s. 71-82.

[8] Germaniuk K.., Wykonywanie izolacji przeciwwodnych z pap zgrzewalnych na pomostach obiektów mostowych, Seminarium Nawierzchnie, izolacje i inne elementy wyposażenia mostów, Warszawa, 18 stycznia 2007, s. 51-70.

[9] Głomb J., Tendencje rozwojowe w projektowaniu nawierzchni mostów drogowych, Drogownictwo 4/72, s. 86-92.

[10] Hema J., Uthrie W.S., Construction and conditio assessment of concrete bridge decks and decision thresholds for deck rehabilitation replacement: state of the practice, TRB 2005 annual meeting, Washington DC, 2005.

[11] Judycki J., Miłkowski W., Alenowicz J., Mastyks do nawierzchni mostowych, , Drogownictwo 2/86, s. 42-47.

[12] Kalabińska M., Piłat J., Radomski W., Wytyczne techniczne określania wymaganej przyczepności między warstwą izolacji i warstwą nawierzchni bitumicznej na drogowych obiektach mostowych, Warszawa, grudzień 1993.

[13] Kilarski R., Analiza i ocena materiałów hydroizolacyjnych na pomosty obiektów mostowych, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, nr 3-4, 1996, s. 105-131.

[14] Kilarski R., Mąkosa J., Germaniuk K., Zasady wykonywania izolacji przeciwwodnych z pap samoprzylepnych na drogowych obiektach mostowych, Warszawa 1991.

[15] Kilarski R., Ochrona przeciwkorozyjna betonowych obiektów mostowych, Drogownictwo 2/95, s. 39-45.

[16] Knight M. L., Wilson G. S., Seger W., Mahadevan S., Overlay Types Used as Preventive Maintenance on Tennsessee Bridge Decks, TRB 2004 annual meeting, Washington DC, 2004.

[17] Krasiński J., Stefańczyk B., Zapobieganie awariom nawierzchni bitumicznych na mostach stalowych, Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane, Międzyzdroje 26-28 maja 1994, 2. 215-224.

[18] Kwapiński M.., Co powoduje, że nawierzchnie mostów w Danii są takie trwałe, Nowości Zagranicznej Techniki Drogowej, 142/2000, s. 89-94.

[19] Majerowicz J., Uszczelnianie i ochrona antykorozyjna płyt pomostów obiektów mostowych i innych powierzchni obciążonych ruchem drogowym, Nowości Zagranicznej Techniki Drogowej, 180/2010, s. 32-39.

[20] Majerowicz J., Uszczelnianie pomostów oraz nawierzchnie z zachodnioeuropejskim budownictwie mostowym, Nowości Zagranicznej Techniki Drogowej, 89/1986, s. 46-57.

[21] Mieczkowski P. , Izolacje z pap asfaltowych na obiektach mostowych, Izolacje 2/2010, s. 16-22.

[22] Piłat J., Radziszewski P., Izolacje przeciwwodne obiektów mostowych, Materiały Budowlane 4 (368), 2003, s. 72-76.
[23] Piłat J., Radziszewski P., Kowalski K.., Nawierzchnie asfaltowe i betonowe na obiektach mostowych, Seminarium Nawierzchnie, izolacje i inne elementy wyposażenia mostów, Warszawa, 18 stycznia 2007, s. 13-22.
[24] Sawicki J., Izolacje konstrukcji obiektów mostowych, Izolacje 11/2009, s. 36-41.
[25] Sybilski D., Nowoczesne nawierzchnie mostów drogowych, Konferencja Kazimierz 1999, s. 249-261.
[26] Von Stosch H. J., Błędy wykonawstwa nawierzchni bitumicznych – przyczyny i usuwanie usterek, WKŁ, Warszawa 1977.
[27] Wawrzycki W., Program mostowy stanu Wirginia (USA) ukierunkowany na XXI wiek, Nowości Zagranicznej Techniki Drogowej, 136/99, s. 79-88.
[28] Wysokowski A., Staszczuk A., Systemy odwodnienia obiektów mostowych, Seminarium Nawierzchnie, izolacje i inne elementy wyposażenia mostów, Warszawa, 18 stycznia 2007, s. 13-22.

2.2 Analiza stanu naprężeń i odkształceń konstrukcji nawierzchni mostowej. Analiza numeryczna konstrukcji nawierzchni mostowej

Opracowanie wykonano w ramach współpracy badawczej, przez Zespół Profesora PW Lesława Kwaśniewskiego z Zakładu Mechaniki Teoretycznej, Wydział IL, PW.

2.2.1 Wprowadzenie

Nawierzchnie drogowe odgrywają szczególną rolę, polegającą na zapewnieniu bezpieczeństwa oraz komfortu jazdy jej użytkownikom. Procedury projektowania nawierzchni drogowych na naziomie 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 naziomie [1]. 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 [2]. 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 [3].

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

Poniższe opracowanie przedstawia 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 [10].

Zagadnienie jest analizowane za pomocą nieliniowej metody elementów skończonych, a obliczenia wykonano z zastosowaniem komercyjnego kodu MES LS-DYNA® [4]. 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 [4]. Stosując tę metodę analizę numeryczną przeprowadza się w dwóch krokach. W pierwszym kroku analizuje się tylko globalne zachowanie mostu pod przejeżdżającym pojazdem

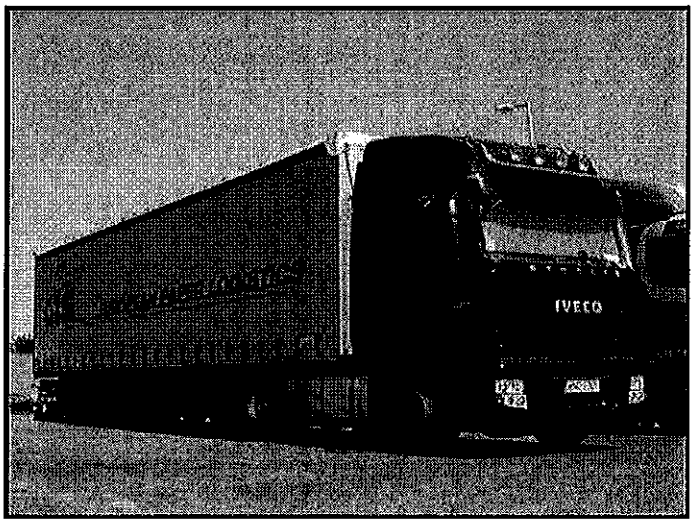
korzystając z modelu o relatywnie rzadkiej siatce. W drugim kroku natomiast uwzględnia się tylko wycinek mostu o zagęszczonej lokalnie siatce podziału na elementy skończone. Jest to ta część konstrukcji w której wyznacza się odkształcenia i naprężenia. W drugim kroku obliczeniowym uwzględnia się warunki kinematyczne na brzegu wycinka, wyznaczone we wcześniejszym kroku obliczeniowym.

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

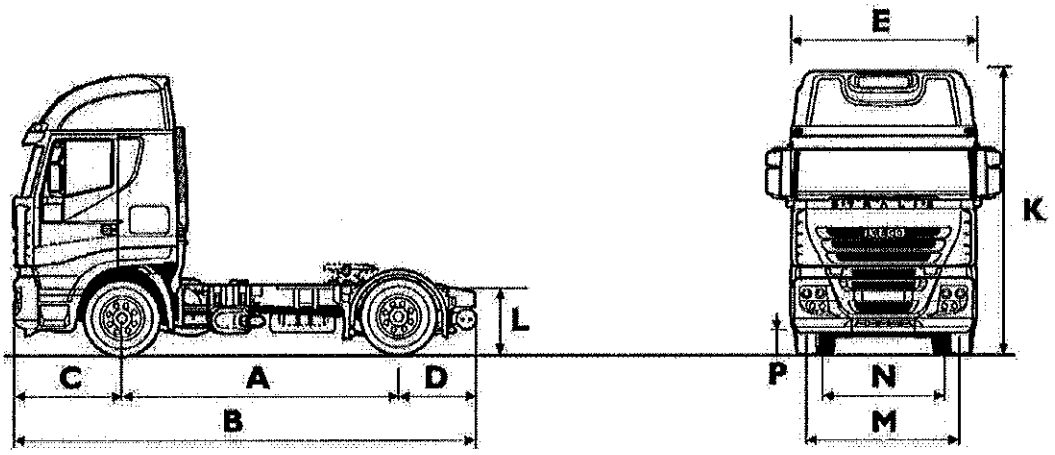
2.2.3 Opracowanie modeli numerycznych

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 naczepy typu NS3S firmy WIELTON (Rys. 2-3) o rozstawie osi równej 1310 mm i długości całkowitej 13,92 m [5]. Cały pojazd składa się z ciągnika siodłowego o masie 4.3 tony oraz naczepy z ładunkiem o masie 36.4 tony.



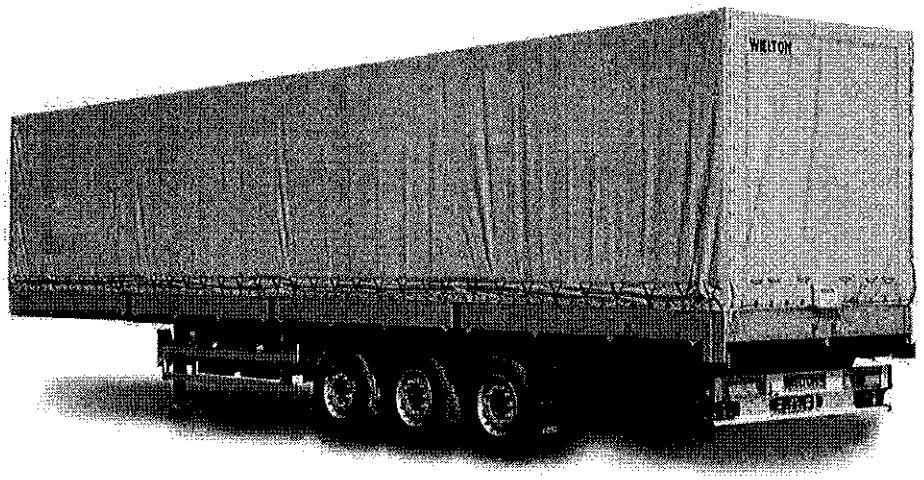
Rys. 2-1. Przykładowy pojazd członowy spotykany w Europie [6]



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) [6]

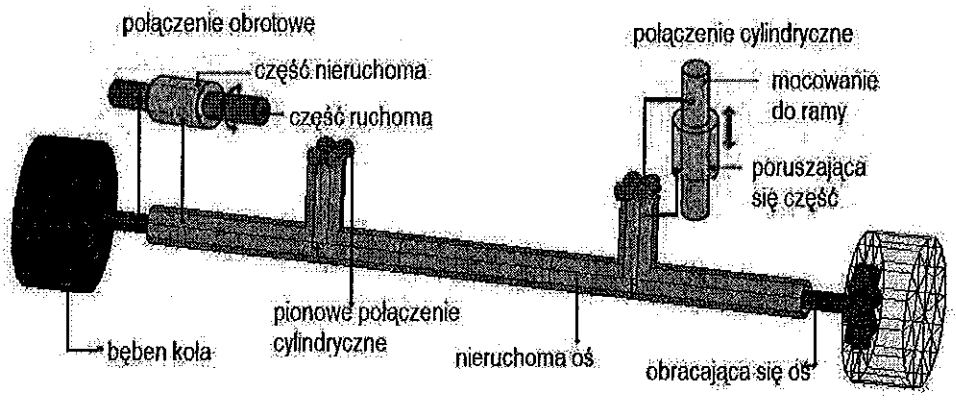


Rys. 2-3. Naczepa typu NS3S firmy WIELTON [5]

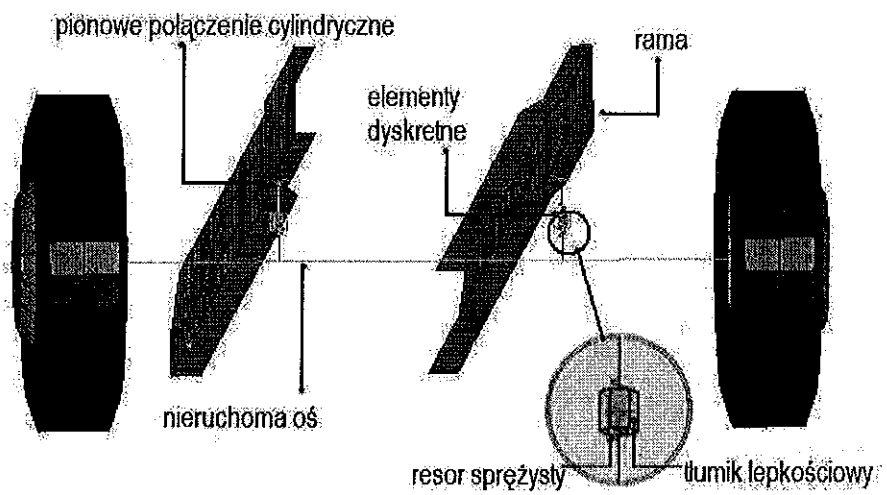
Model MES pojazdu

W pracy wykorzystano model numeryczny wcześniej opracowanego pojazdu ciężarowego [7], 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' [4]. 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).

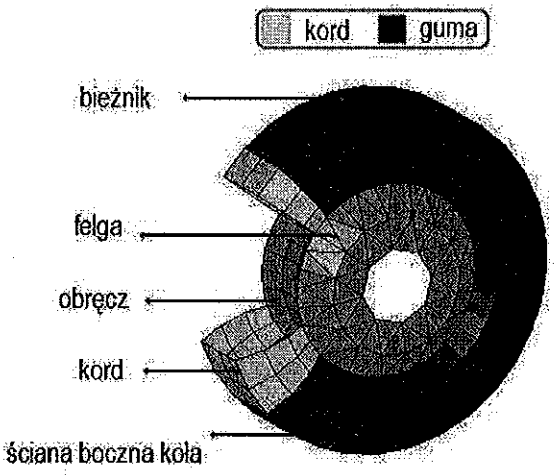


Rys. 2-4. Schemat połączeń zastosowanych w modelu MES zawieszenia [8]



Rys. 2-5. Zastosowanie elementów dyskretnych w modelu zawieszenia [8]

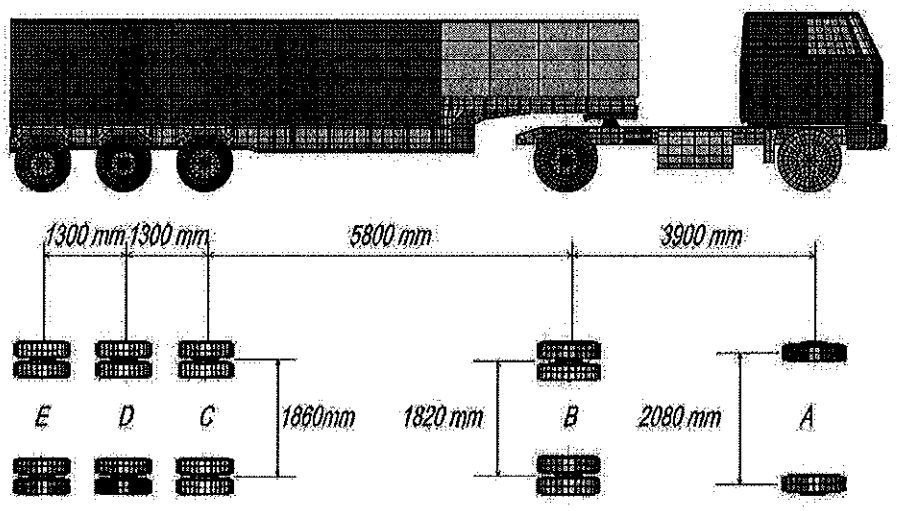
Prawidłowe odwzorowanie kół pojazdu jest kluczowym elementem w analizie numerycznej. Istniejące obecnie metody modelowania umożliwiają stworzenie pneumatycznych, trój-wymiarowych i obracających się kół oddziaływujących z nawierzchnią za pomocą dobrze dobranego algorytmu kontaktu. W modelu wykorzystano 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' [4]. Wartość ciśnienia w każdej z nich została podana w dalszej części raportu.



Rys. 2-6. Model MES koła wraz z opisem elementów [8]

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.

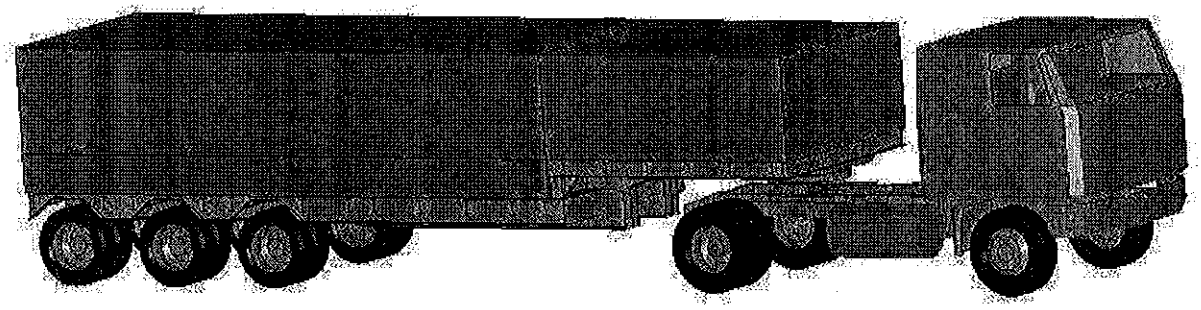
Pozostała część pojazdu ze względu na nikły wpływ na wyniki oraz wymagany czas analizy numerycznej została zamodelowana w sposób uproszczony za pomocą ciał sztywnych. Szczegóły dotyczące rozstawu osi oraz widok pojazdu z boku przedstawiono na Rys. 2-7. Ładunek oraz ciężar pojazdu dobrano w taki sposób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

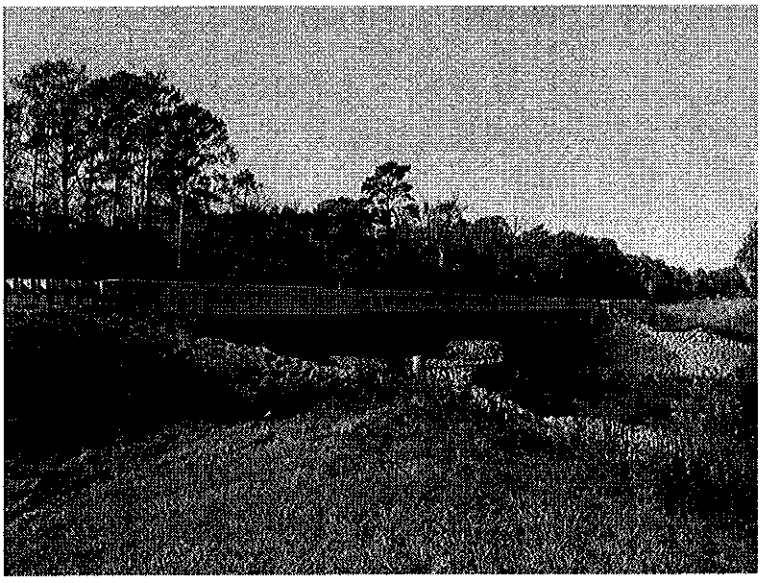
Oś	Nacisk w modelu MES [kN]	Nacisk wg specyfikacji [kN]	Błąd względny [%]	Ciśnienie w oponach [bar]
A	45,56	45	-1,24	7.6
B	118,95	115	-3,43	6.9
C	85,30	80	-6,63	8.3
D	82,56	80	-3,2	8.3
E	79,05	80	1,19	8.3



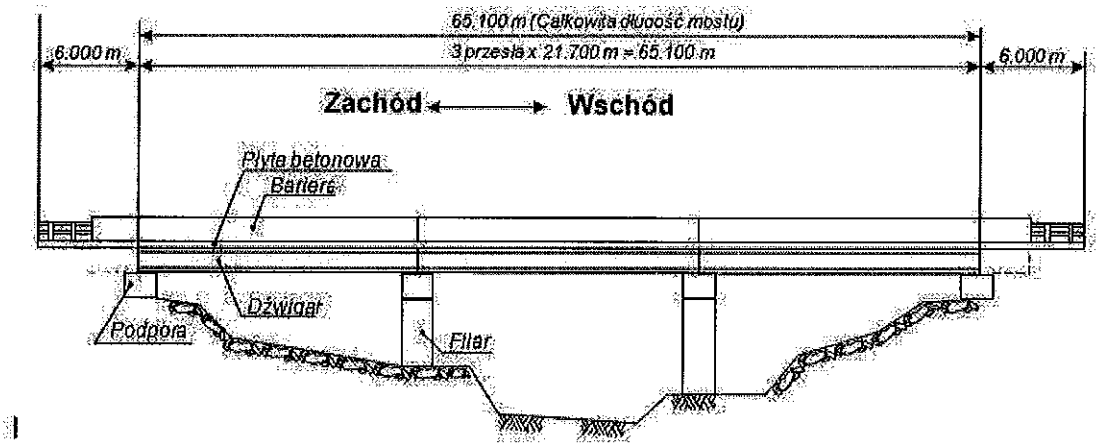
Rys. 2-8. Model MES pojazdu ciężarowego z odpowiednio dobranym ładunkiem

Specyfikacja wybranego mostu

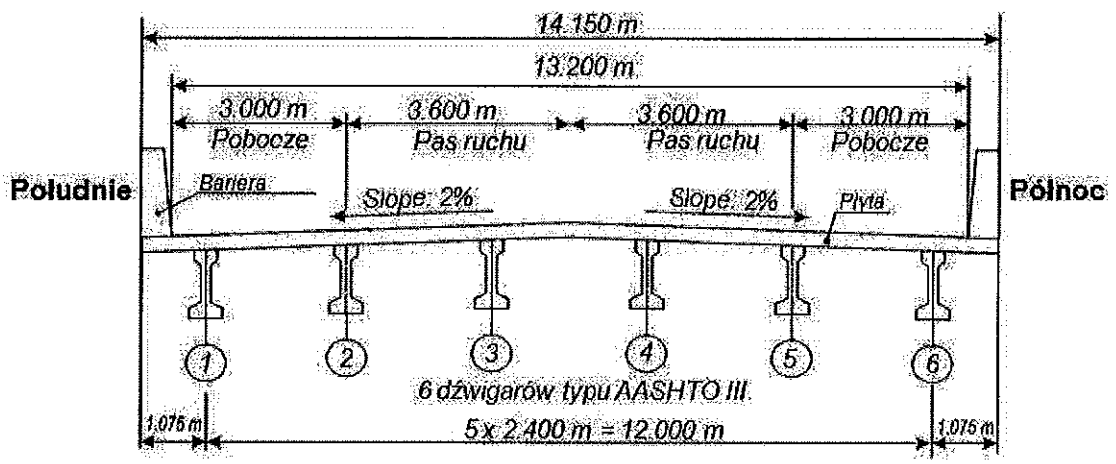
W pracy wykorzystano specyfikację trójprzęsłowego mostu wybudowanego w 1999 roku nad rzeką Mosquito w zachodniej Florydzie (Rys. 2-9) [9]. Każde przęsło mostu ma długość 21.7 m i jest podtrzymywane przez 6 dźwigarów strunobetonowych typu AASHTO III rozstawionych co 2.4 m [9].Na moście znajdują się dwa pasy ruchu o szerokości 3.60 każdy, z obustronnym poboczem o szerokości 3 m. Całkowita szerokość przęsła 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) [9]



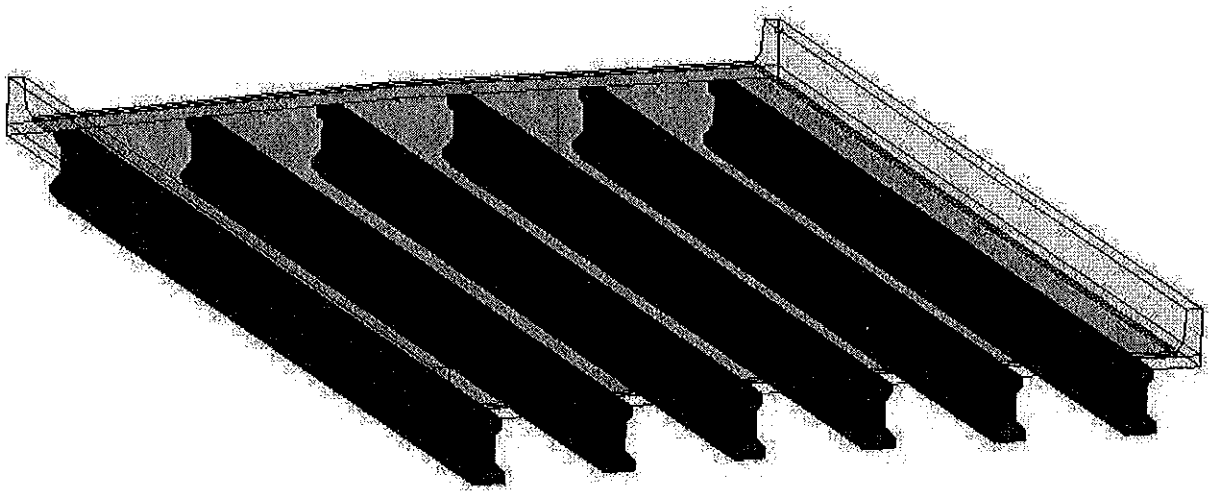
Rys. 2-10. Przekrój podłużny mostu nad strumykiem Mosquito (USA) [10]



Rys. 2-11. Przekrój poprzeczny mostu nad strumykiem Mosquito (USA) [10]

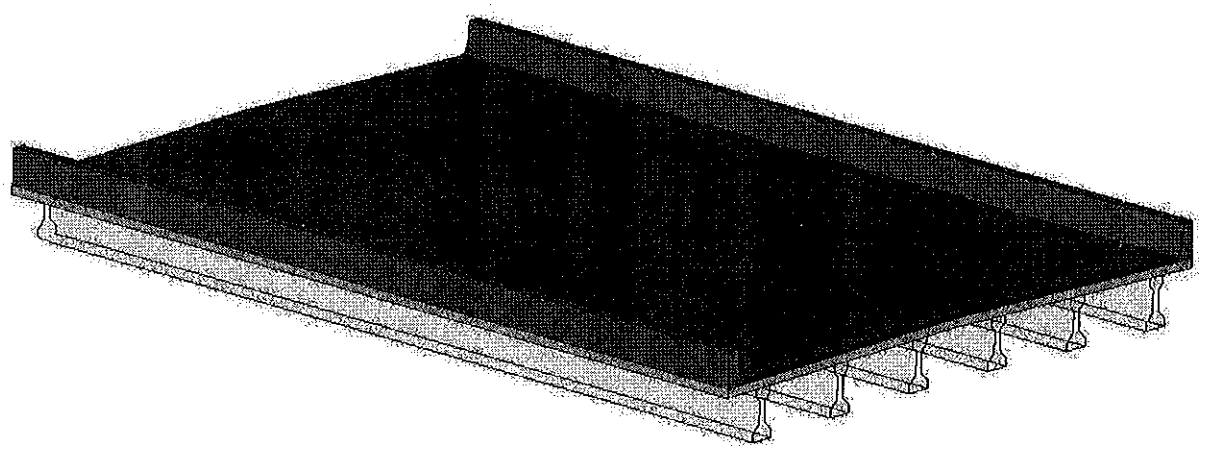
Model MES mostu

W pracy posłużono się modelem mostu opracowanym przez Crashworthiness and Impact Analysis Laboratory CIAL [9]. Dźwigary podtrzymujące most (Rys. 2-12) zostały zamodelowane elementami bryłowymi za pomocą materiału sprężystego o parametrach: $\rho = 2.3 t/m^3$, $E = 37.5 GPa$ $\upsilon = 0.2$. Zbrojenie miękkie znajdujące się w każdym dźwigarze (6 prętów o średnicy 16mm) zostało zamodelowane elementami belkowymi o parametrach typowych dla stali zbrojeniowej: $\rho = 7.85 t/m^3$, $E = 210 GPa$ $\upsilon = 0.3$. 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 barierek (spadek 2%, wg *Rys. 11*). Model płyty zamodelowano elementami bryłowymi z materiału sprężystego o parametrach: $\rho = 2.3\ t/m^3$, $E = 40\ GPa$, $\upsilon = 0.2$. Bariery betonowe (Rys. 2-13) o wymiarach 46cm x 82,5cm zostały zamodelowane z materiału sprężystego o parametrach $\rho = 2.3 t/m^3$, $E = 37.5 GPa$ $\upsilon = 0.2$.



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 Tablicy 2-2. Poniżej znajduje się 4 centymetrowa warstwa asfaltu lanego (MA), zamodelowanego również za pomocą uogólnionego modelu Maxwella o właściwościach przedstawionych w Tablicy 2-3.

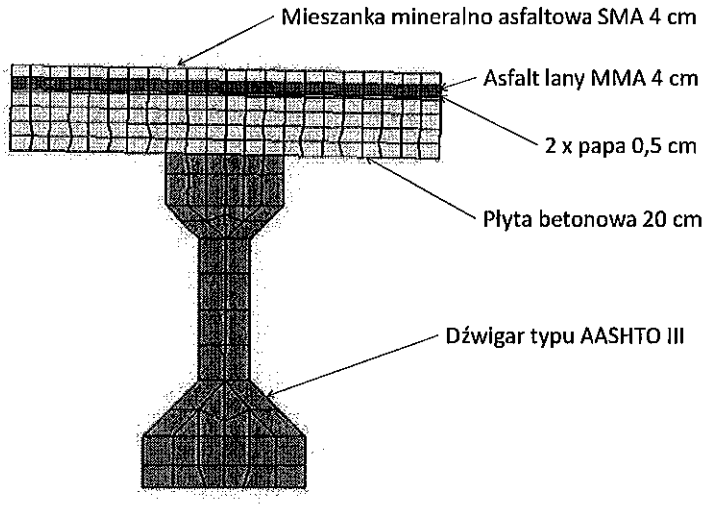
Tablica 2-2. Parametry szeregu Prony'ego do modelu materiałowego warstwy ścieralnej SMA

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

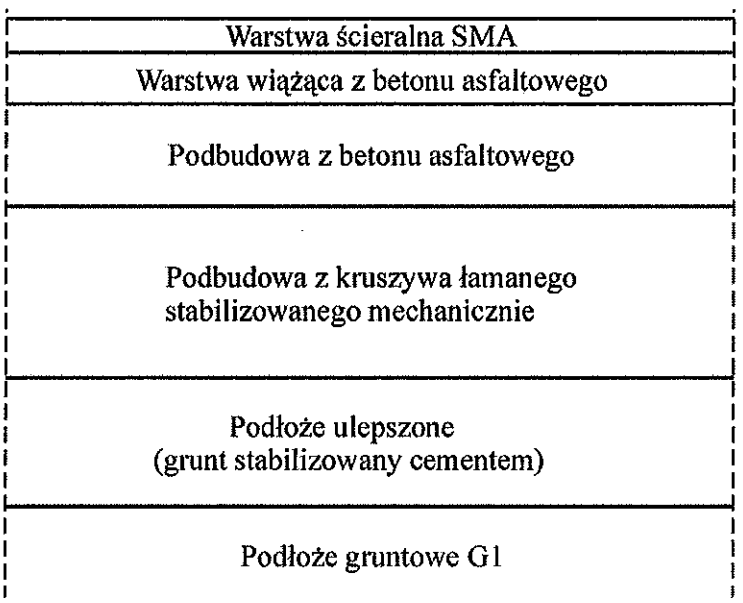
Pomiędzy warstwami asfaltowymi, a płytą betonową znajduje się podwójna warstwa papy o łącznej grubości 1 cm. W analizowanym modelu nie uwzględniano tej warstwy jako warstwy konstrukcyjnej, zaś jedynie jako warstwę zapewniającą współprace nawierzchni z konstrukcją mostu. Do zamodelowania tej warstwy użyto 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 sczepności nawierzchni asfaltowej z konstrukcją mostu w zakresie od 0% do 100%, gdzie 0% oznacza brak czepności (poślizg), zaś 100% oznacza pełną współprace nawierzchni z konstrukcja 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 naziomie [11]

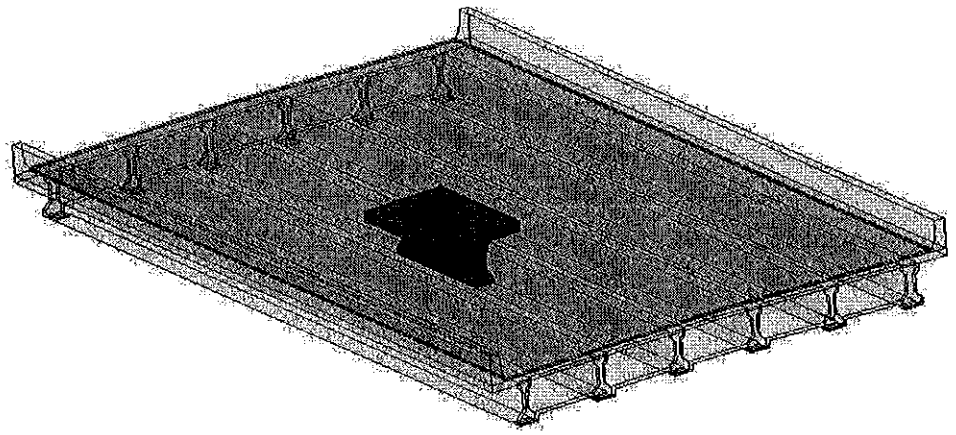
E_1= 9800 MPa	ν_1= 0,3	h_1= 4 cm
E_2= 11500 MPa	ν_2= 0,3	h_2= 6 cm
E_3= 10900 MPa	ν_3= 0,3	h_3= 12 cm
E_4= 400 MPa	ν_4= 0,3	h_4= 20 cm
E_5= 300 MPa	ν_5= 0,3	h_5= 15 cm
E_6= 100 MPa	ν_6= 0,35	h_6= 55 cm

Rys. 2-16. Parametry warstw nawierzchni na naziomie [11]

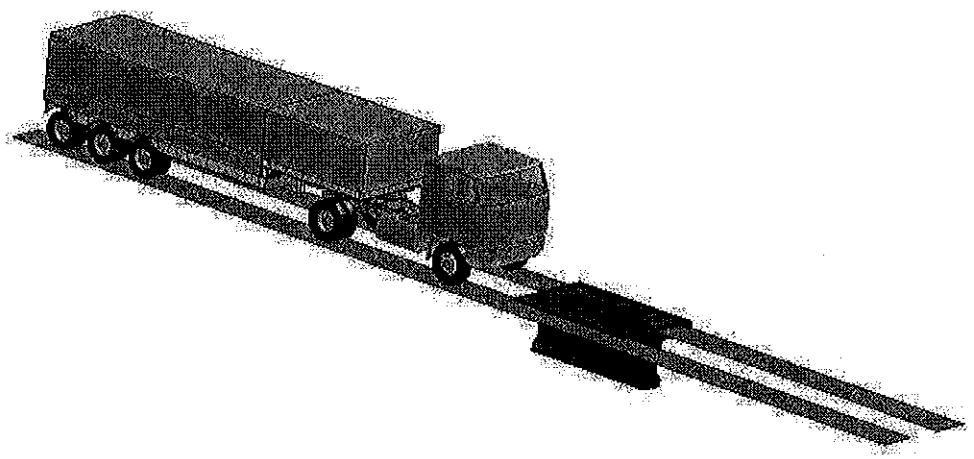
Submodelling

Nawierzchnia na obiekcie mostowym

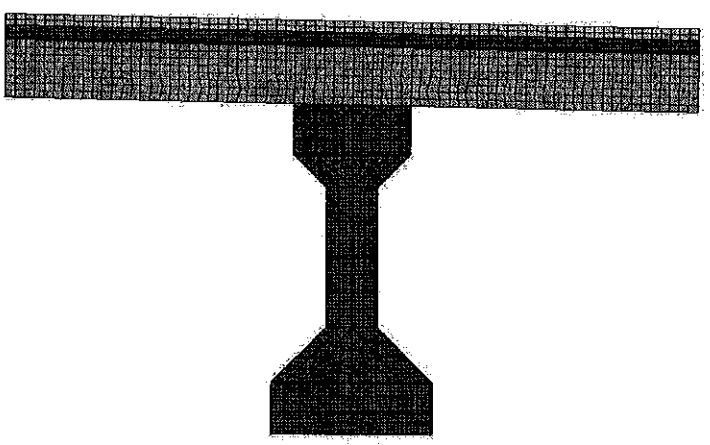
Przy analizie numerycznej dużych konstrukcji, oraz długim czasie analizy, częstym problemem jest uzyskanie odpowiedniej gęstości siatki w celu lokalnego oszacowania naprężeń oraz odkształceń. Te wartości są silnie zależne od gęstości siatki, więc w przypadku analizowanego mostu powinno być przynajmniej 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 [4]. 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



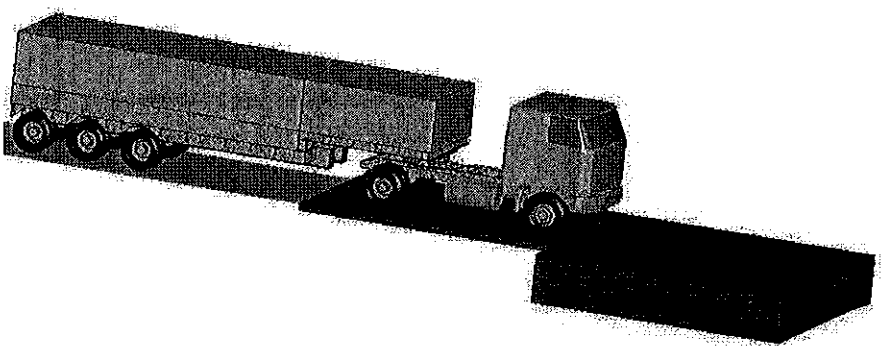
Rys. 2-18. Fragment wybrany do submodelingu wraz z pojazdem



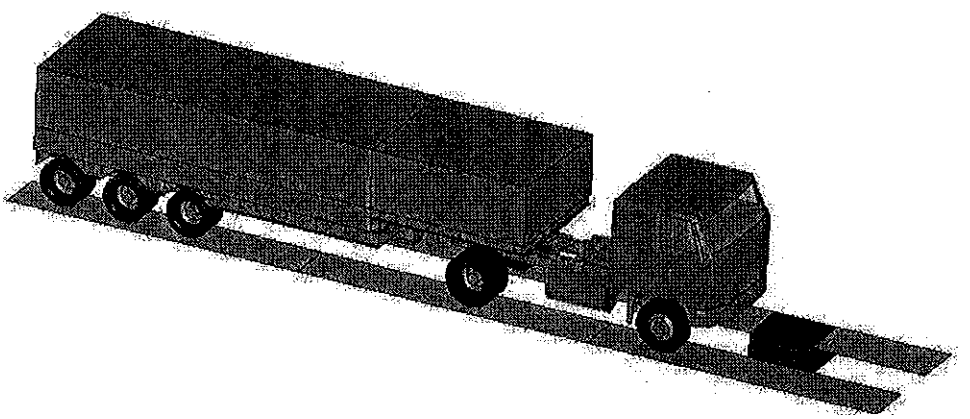
Rys. 2-19. Przekrój przez fragment modelu mostu z zagęszczoną siatką podziału

Nawierzchnia na naziomie

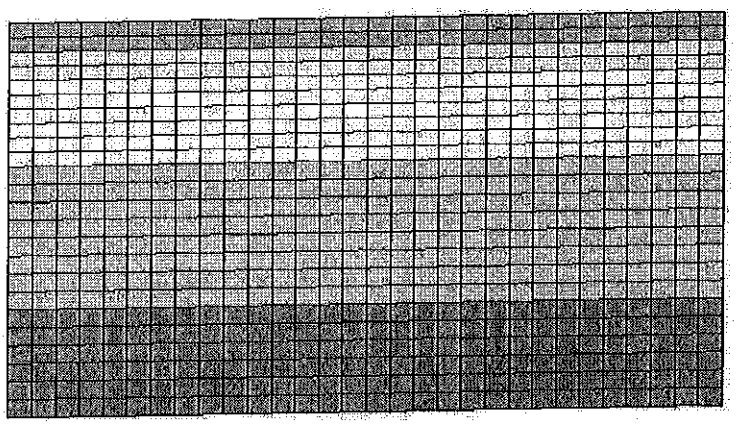
W analizie numerycznej nawierzchni drogowej na naziomie również wykorzystano metodę submodellingu. W pierwszej części obliczeń przeprowadzono analizę z wykorzystaniem całego modelu (Rys. 2-20). Następnie przeanalizowano jedynie wycinek nawierzchni o zagęszczonej siatce podziału (Rys. 2-22) na elementy 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 naziomie



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 ustalanie 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).

Tablice 2-4 i 2-5 zawierają 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:

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

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

$$\overline{E}(i\omega) := E_{dyn}(\omega)\cos\varphi + i\,E_{dyn}(\omega)\,\sin\varphi = E'(\omega) + i\,E''(\omega) \tag{2}$$

gdzie:

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

$E''(\omega) = E_{dyn}(\omega)\,\sin\varphi$ - 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 0^0 dla materiałów idealnie sprężystych oraz 90^0 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.

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

W Tablicach 2-6 i 2-7 przedstawiono część rzeczywista 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

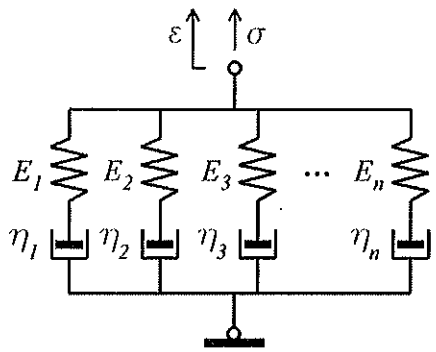
N	Częstotliwość f [Hz]	Moduł zachowawczy E' [MPa]	Moduł stratności E'' [MPa]
1	0,1	1867	691
2	0,5	2763	925
3	1	3170	993
4	5,0	4237	1096
5	10,0	4832	1178
6	25,0	5405	1368

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:

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

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:

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

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 Tablicach 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.

Dobrane parametry modelu

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

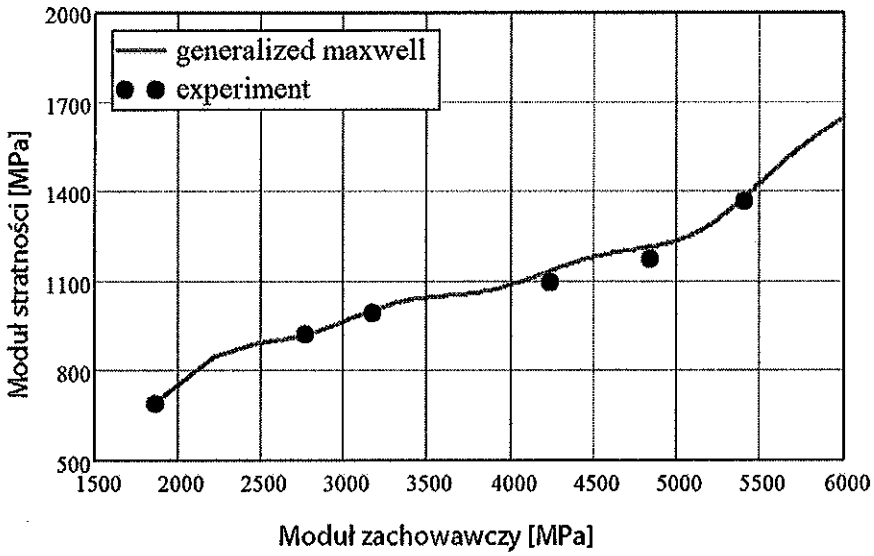
Tablica 2-8. Wyniki optymalizacji parametrów uogólnionego modelu Maxwella. Mieszanka mineralno-asfaltowa (TYP-1)

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

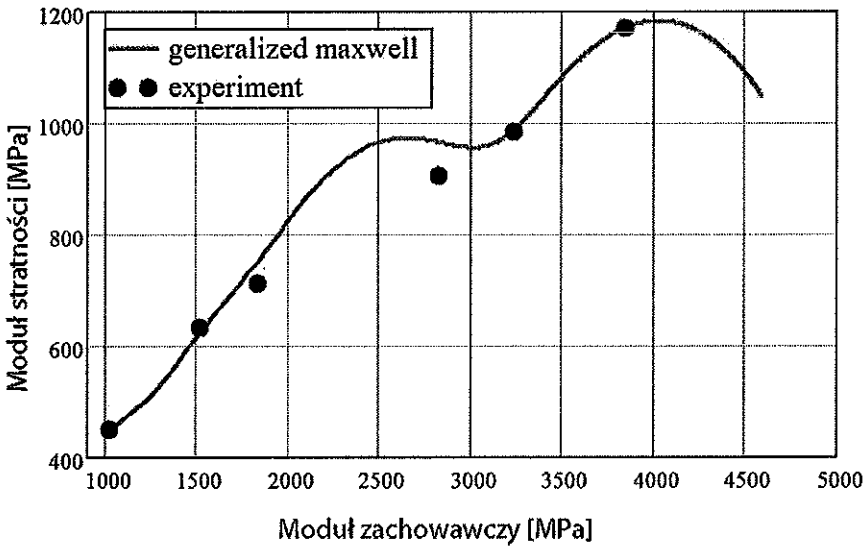
Tablica 2-9. Wyniki optymalizacji parametrów uogólnionego modelu Maxwella. Mieszanka mineralno-asfaltowa (TYP-2)

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

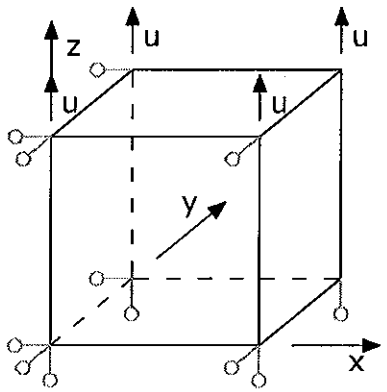
Testy materiałowe

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. Sześcienna 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 rozważań.

Dziedzina częstotliwości

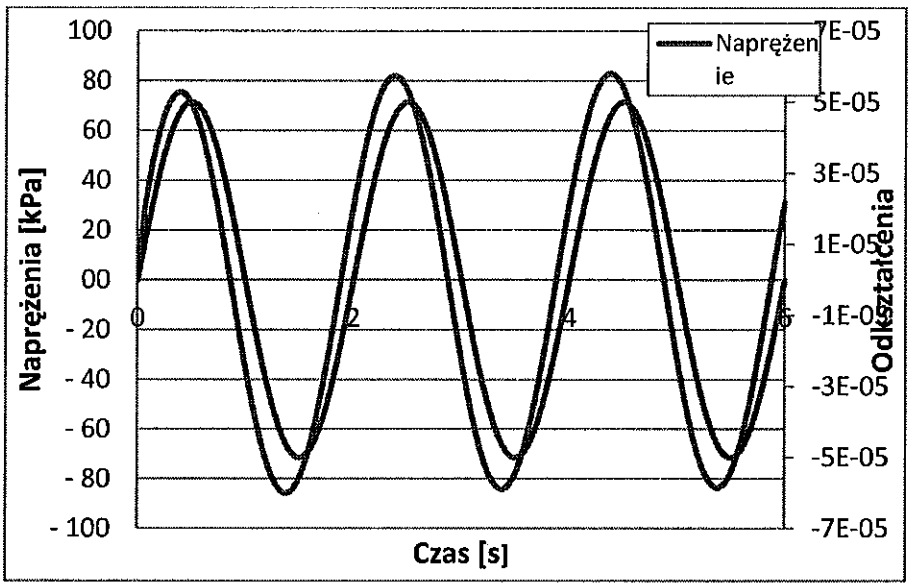
Badano odpowiedź modelu w zależności od częstości wymuszenia. Próbka poddana została cyklicznemu obciążeniu (sterowanie przemieszczeniem). Badany model ma kształt sześcianu i poddany jest prostemu rozciąganiu w kierunku pionowym. Schemat podparcia i obciążenia przedstawia Rys. 2-26. Model stanowi jeden 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 mmm/mm). W rzeczywistej konstrukcji materiał doznaje odkształceń podobnego rzędu oraz możliwa jest analiza w ramach teorii małych odkształceń.

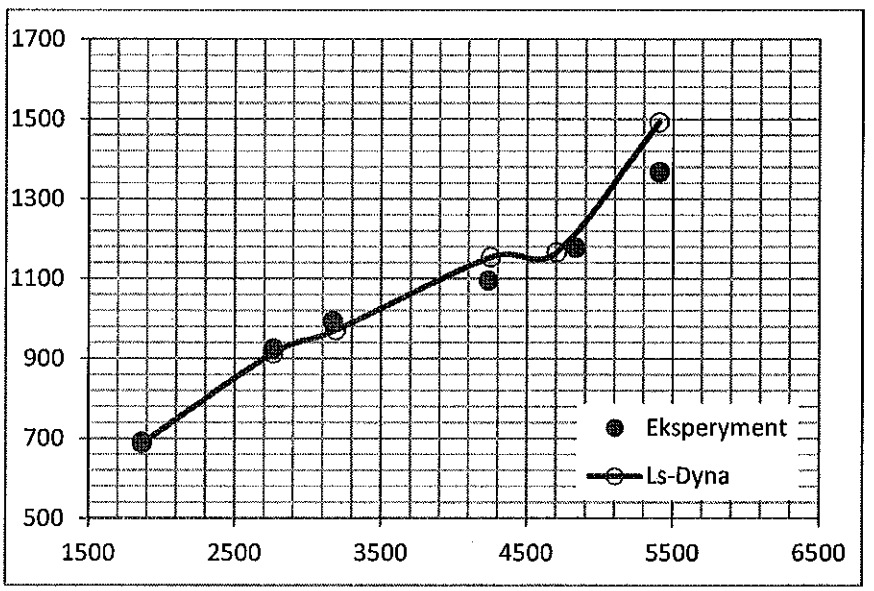


Rys. 2-26. Schemat podparcia i obciążenia sześciennej próbki

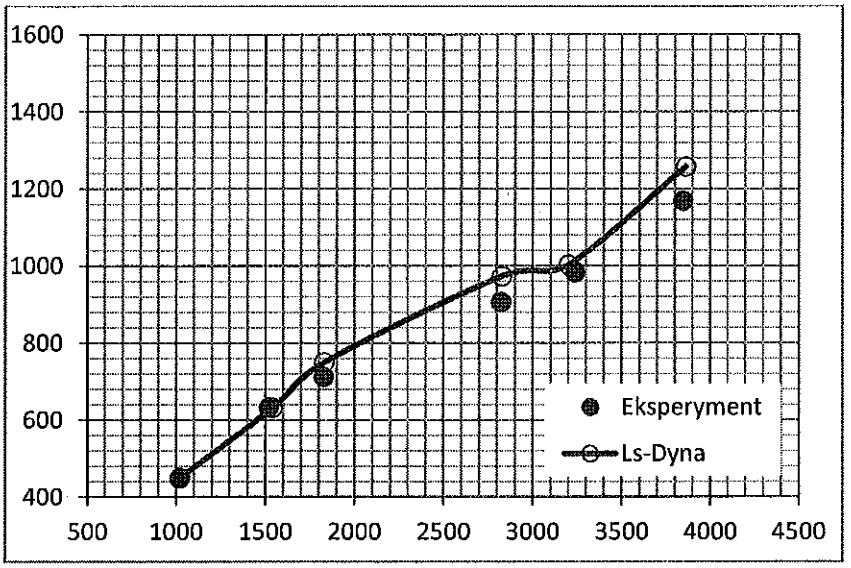
W wyniku przeprowadzonych symulacji otrzymano dla różnych częstości wykresy naprężeń i odkształceń. Przykładowe porównanie wykresów naprężeń i odkształceń (przeskalowane) uzyskane dla wymuszenia z częstością 0.5 Hz, przedstawiono Rys. 2-27. Możliwe było na ich podstawie wyliczenie wartości modułu zespolonego 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 częstości [0.1 Hz; 0.5 Hz; 1 Hz;] uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników. Kilkuprocentowe rozbieżności jakie pojawiły się dla wyższych częstości można wytłumaczyć prawdopodobnie błędami w całkowaniu numerycznym równań.



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



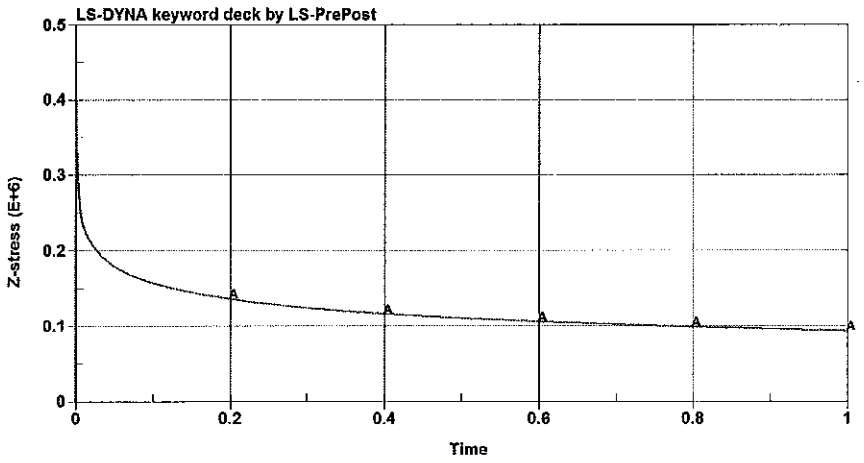
Rys. 2-28. Wyniki testów numerycznych uogólnionego modelu Maxwella (model 5- gałęziowy). Charakterystyka Nyquista. Mieszanka Typ-1.



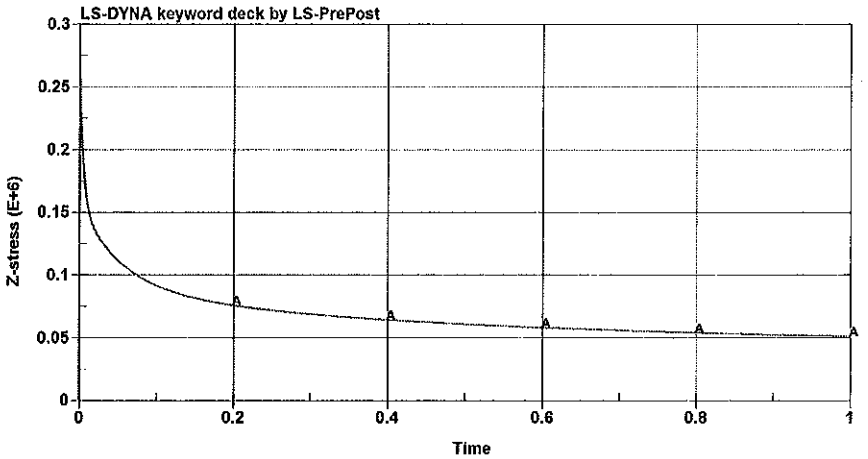
Rys. 2-29. Wyniki testów numerycznych uogólnionego modelu Maxwella (model 5- gałęziowy). Charakterystyka Nyquista. Mieszanka Typ-2

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. Pomiary 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 mmm/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

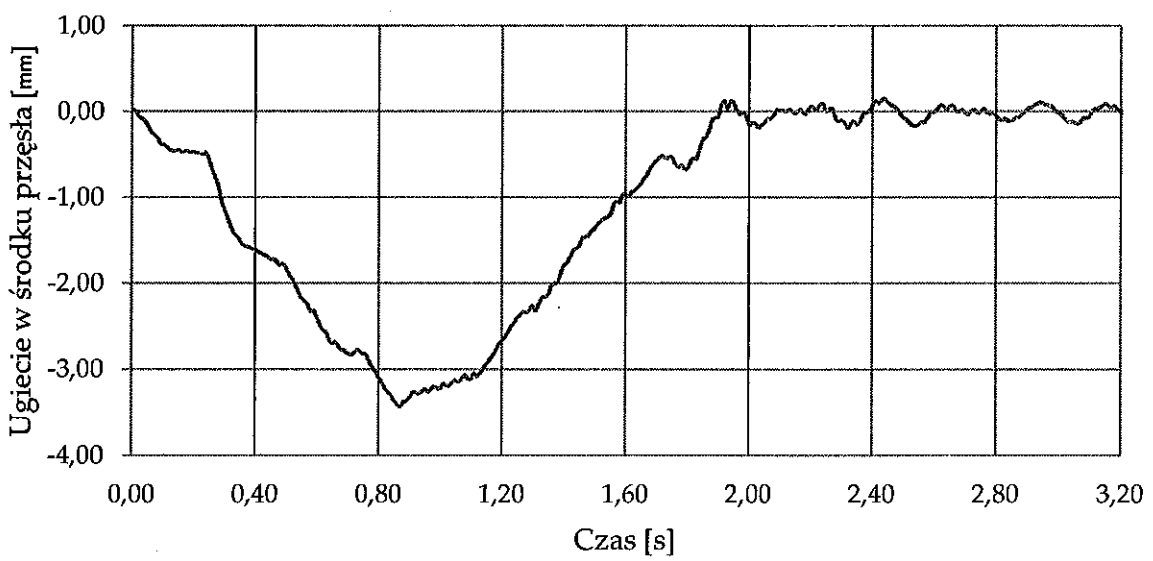


Rys. 2-31. Zmiany wartości naprężeń normalnych w czasie. Mieszanka Typ-2

2.2.5 Wyniki obliczeń

Wpływ stopnia sczepności

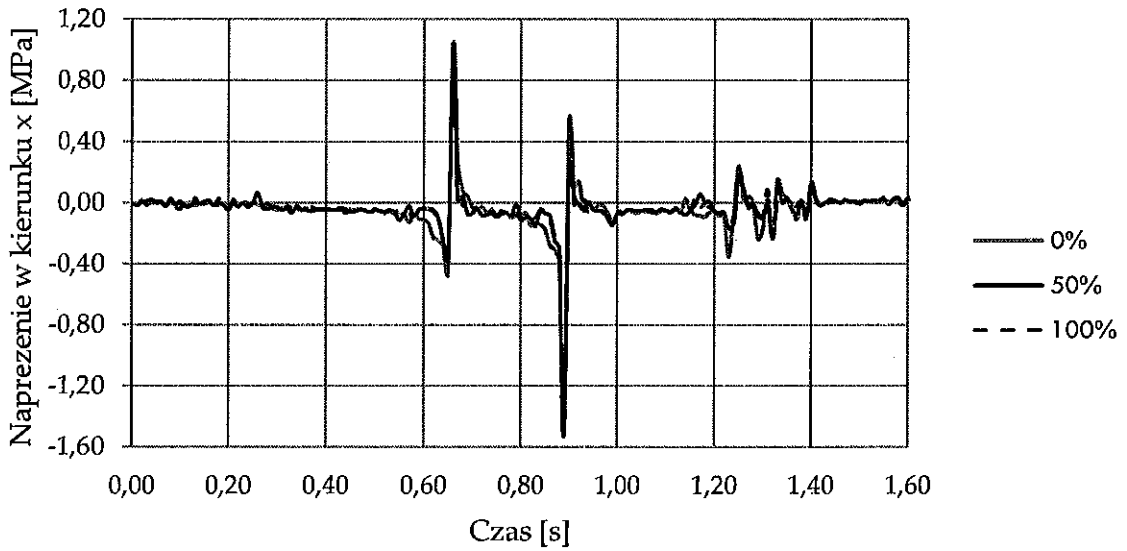
Prezentowane wyniki dotyczą przypadku przejazdu jednego pojazdu członowego z prędkością 60 km/h. Rozpatrzono 3 przypadki sczepności nawierzchni mostowej z konstrukcją mostu: 0%, 50% oraz 100%. Na Rys. 2-32 i Rys. 2-32 przedstawiono historię ugięcia środka przęsła pod obciążeniem pochodzącym od pojazdu.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



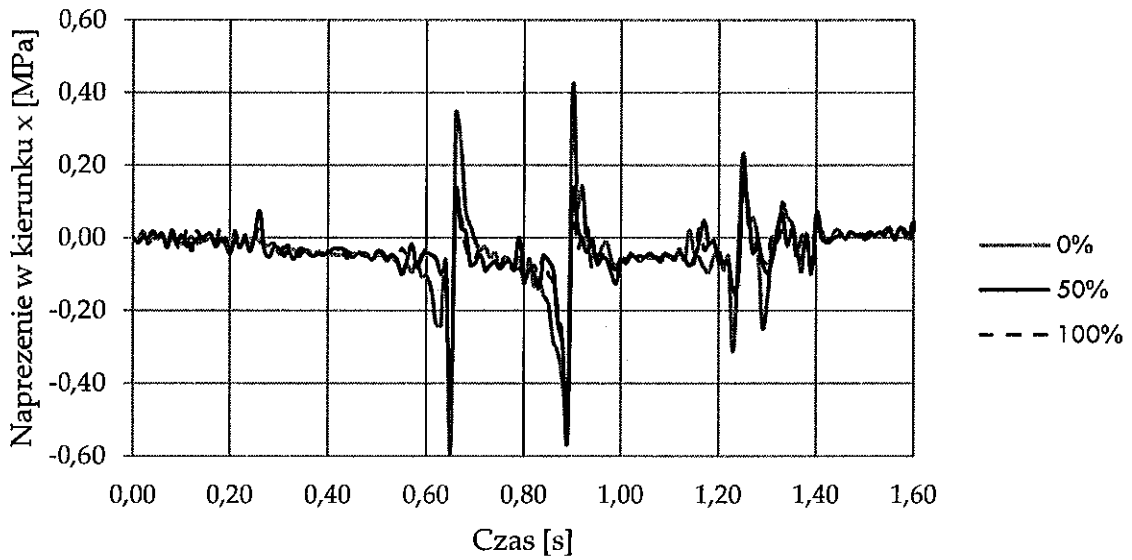
Rys. 2-32. Zmienność w czasie ugięcia środka przęsła pod działaniem przejeżdżającego pojazdu członowego o masie 40 ton

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.

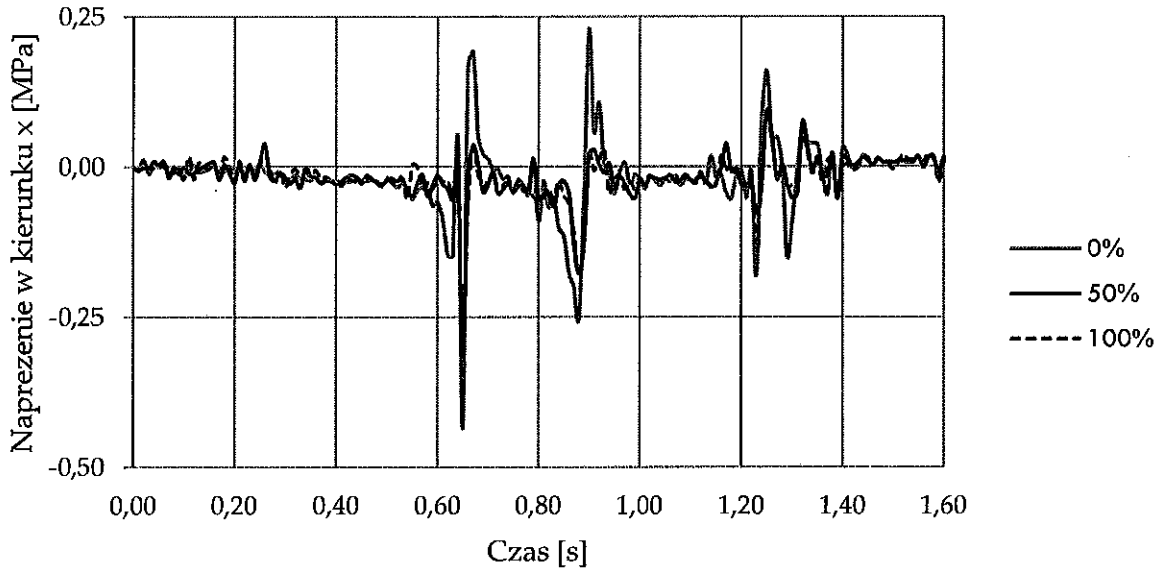
Na Rys. 2-33 do Rys. 2-36 przedstawiono naprężenia w kierunku jazdy pojazdu oznaczone jako σ_x odpowiednio w elementach znajdujących się na górze i dole obu warstw asfaltowych. Przedstawiono wyniki dla różnego stopnia sczepności nawierzchni asfaltowych do betonowego pomostu.



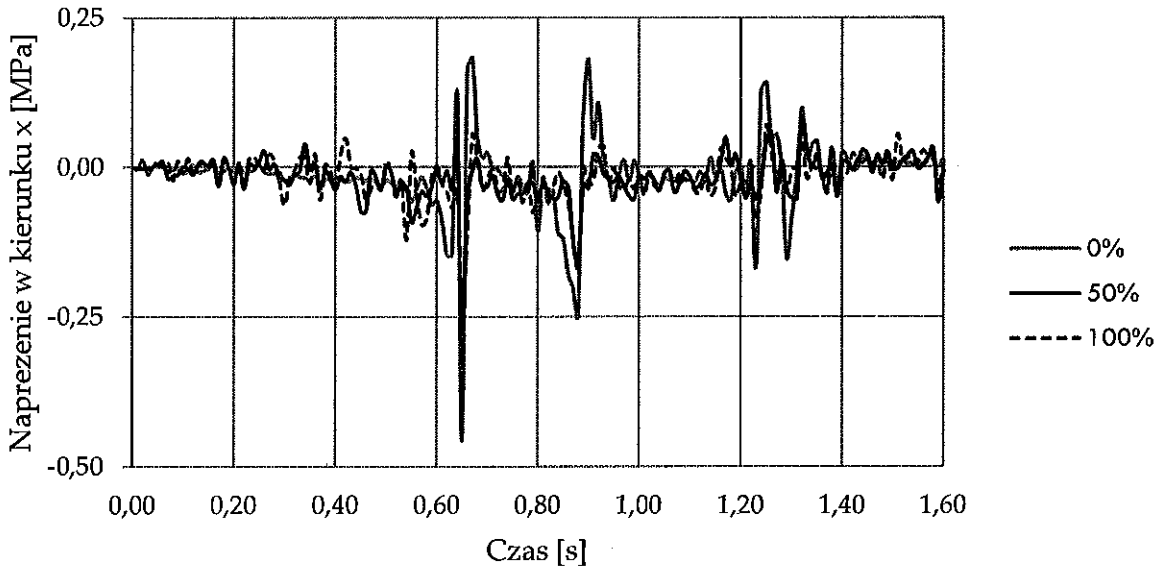
Rys. 2-33. Zmienność w czasie naprężenia σ_x górnego elementu warstwy SMA w kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia sczepności



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

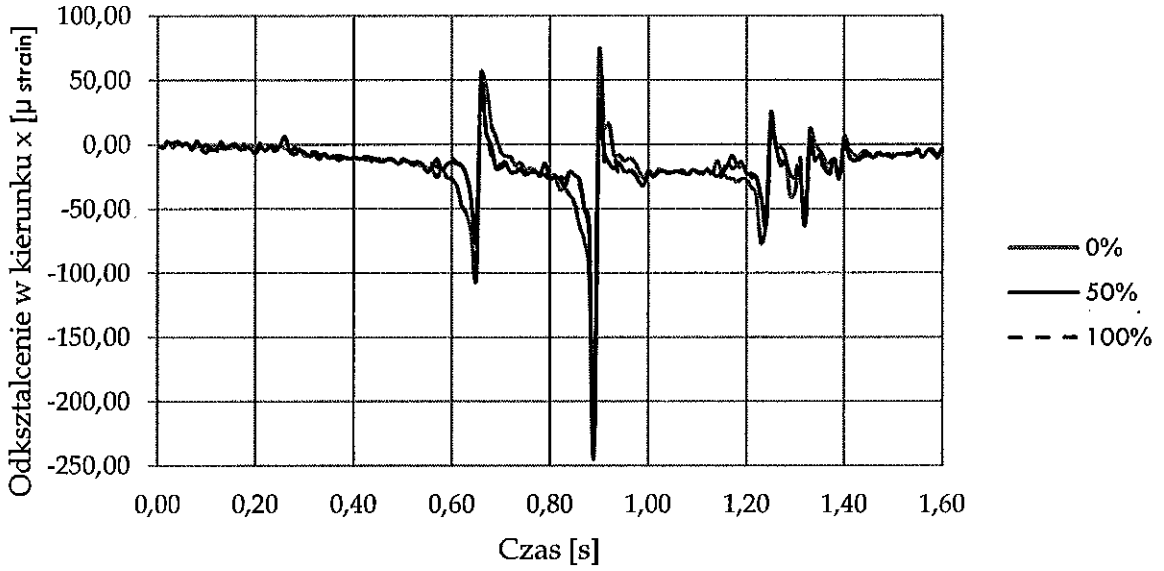


Rys. 2-35. Zmienność w czasie naprężenia σ_x górnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia sczepności

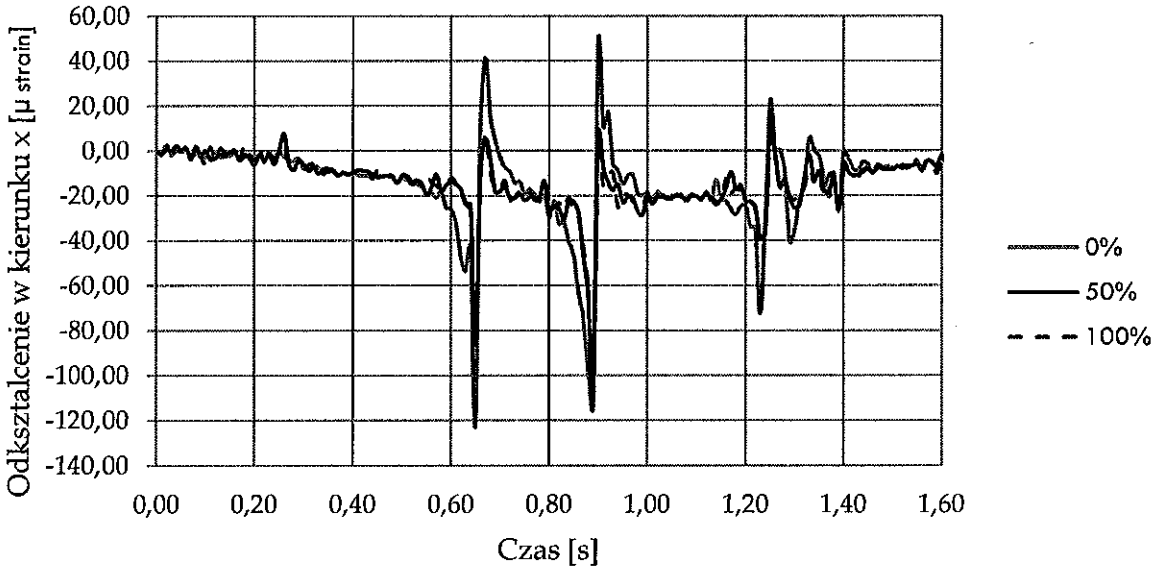


Rys. 2-36. Zmienność w czasie naprężenia σ_x dolnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia sczepności

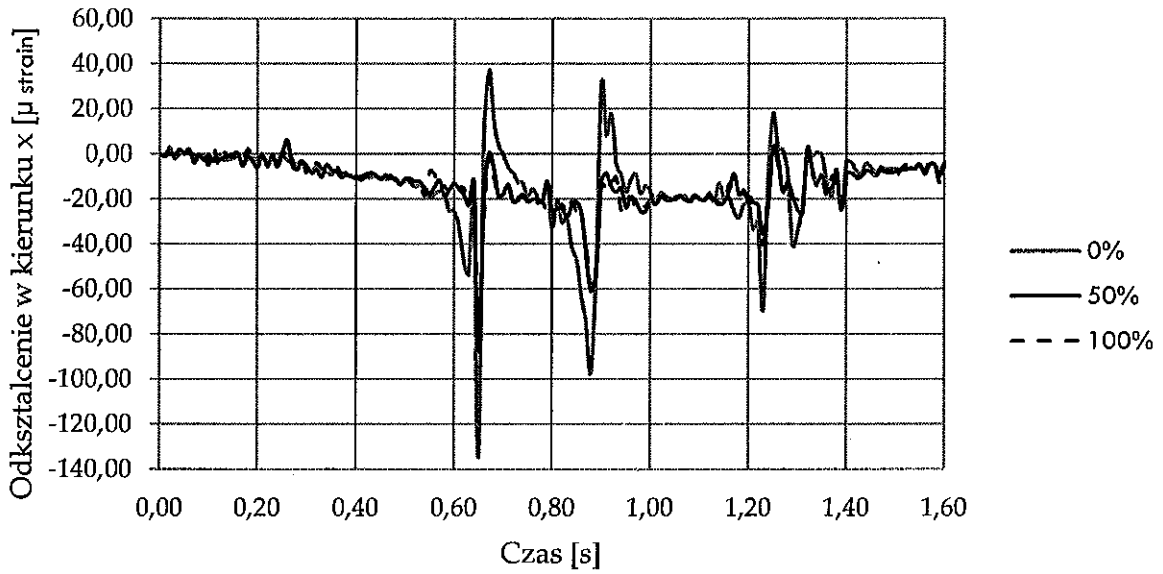
Na Rys. 2-37 do Rys. 2-40 przedstawiono odkształcenia w kierunku ruchu pojazdu oznaczone jako ε_x odpowiednio w górnych i dolnych elementach obu warstw asfaltowych. Przedstawiono wyniki dla różnego stopnia sczepności warstwa nawierzchni asfaltowych do konstrukcji mostu.



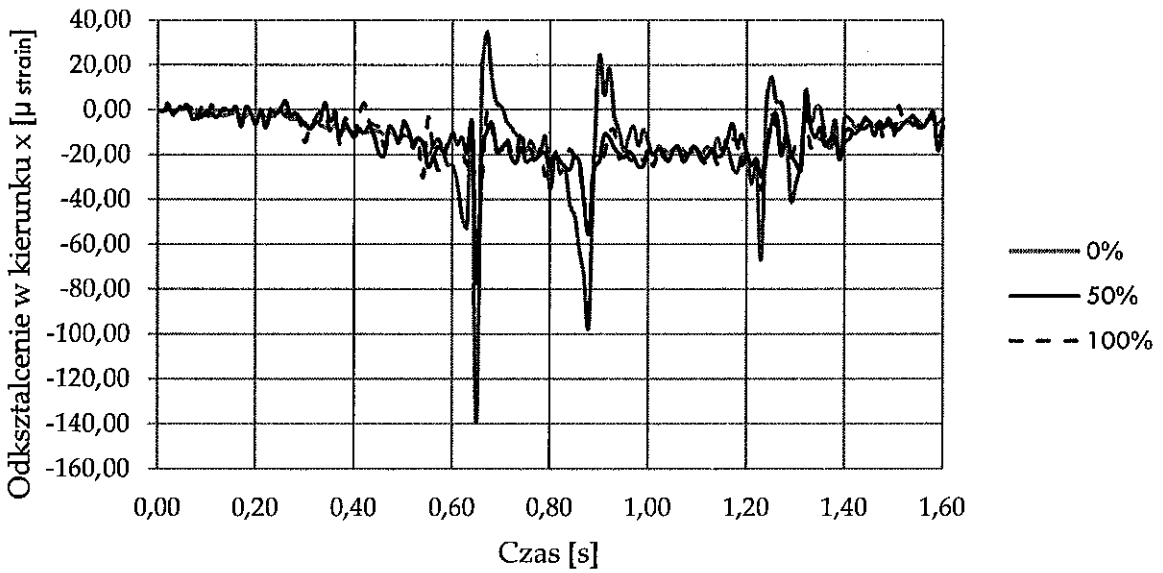
Rys. 2-37. Zmienność w czasie odkształcenia ε_x górnego elementu warstwy SMA w kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia sczepności



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

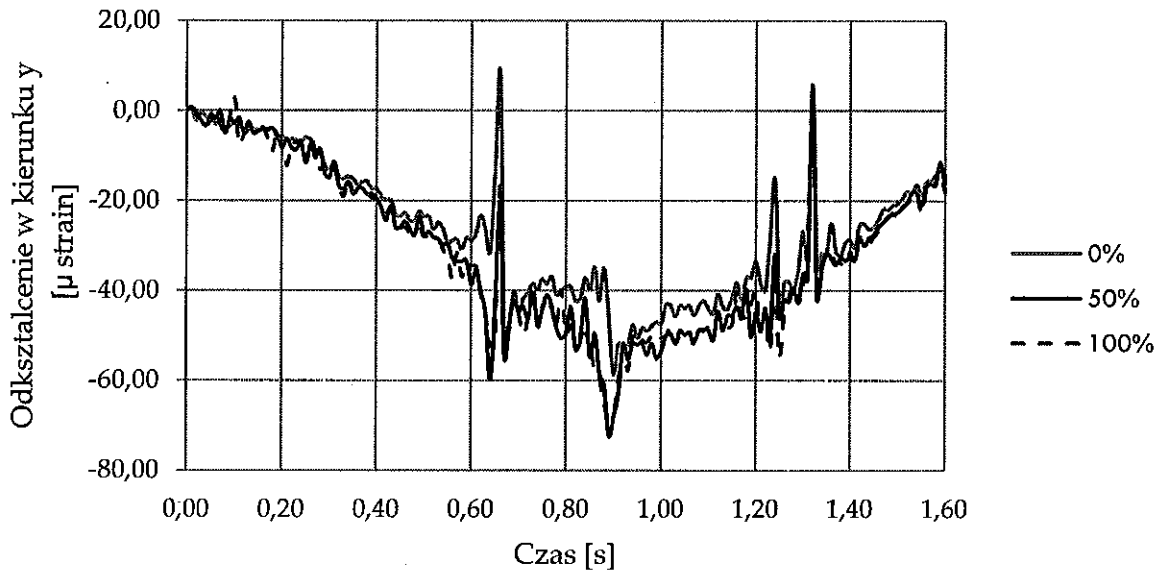


Rys. 2-39. Zmienność w czasie odkształcenia ε_x górnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia sczepności

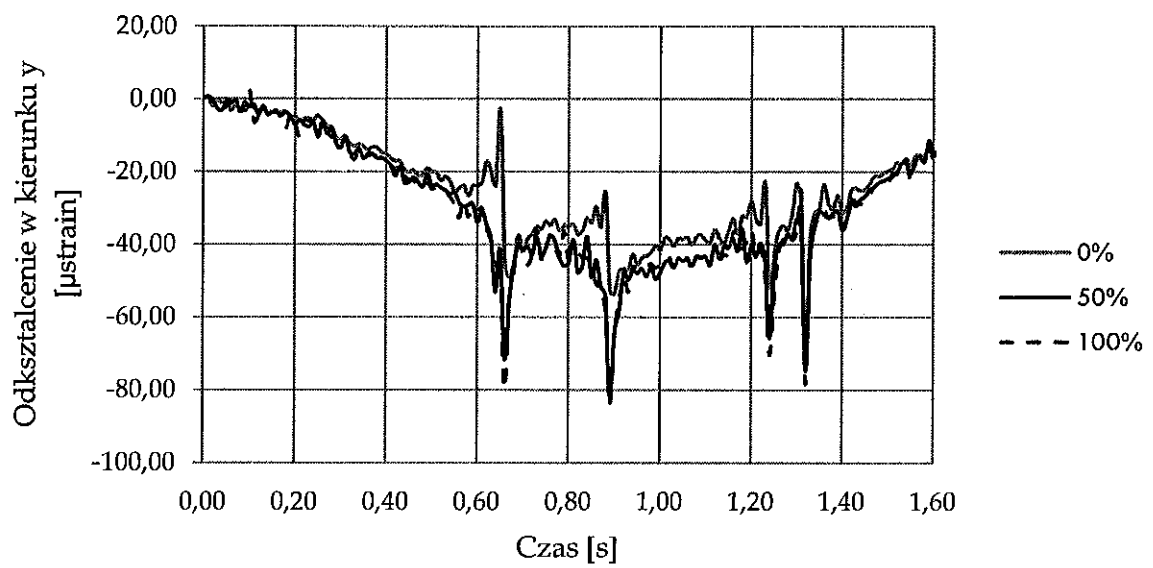


Rys. 2-40. Zmienność w czasie odkształcenia ε_x dolnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia sczepności

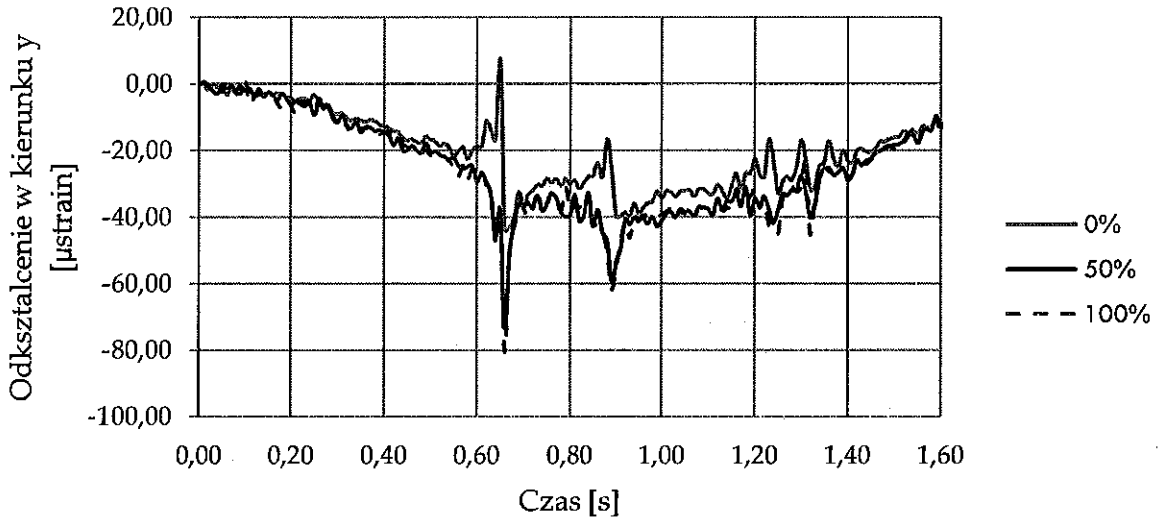
Na Rys. 2-41 do Rys. 2-44 przedstawiono odkształcenia w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu pojazdu, oznaczone jako ε_y elementach znajdujących się na górze i na dole warstw asfaltowych. Przedstawiono wyniki dla różnego stopnia sczepności warstwa nawierzchni asfaltowych do konstrukcji mostu.



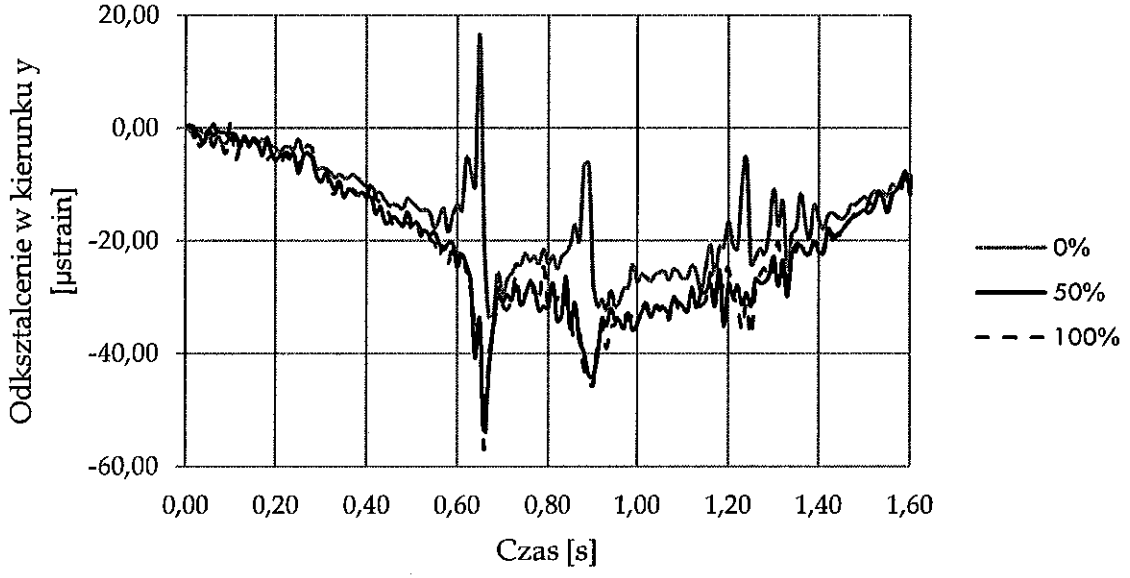
Rys. 2-41. Zmienność w czasie odkształcenia ε_y górnego elementu warstwy SMA w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu pojazdu dla zmiennego stopnia sczepności



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



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



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

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

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

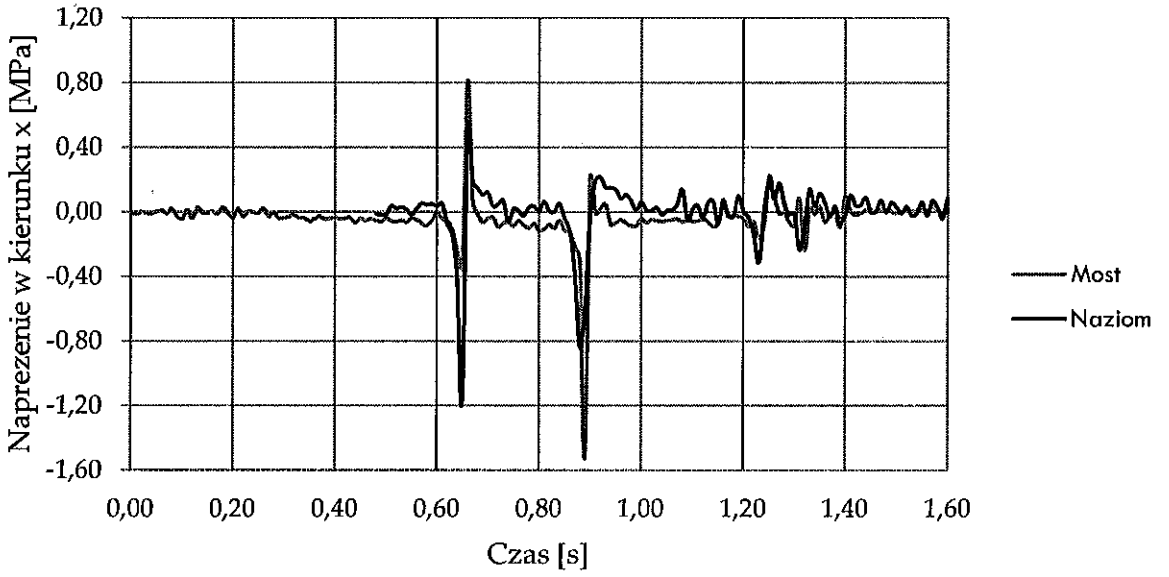
			Sczepność 0%	Sczepność 50%	Sczepność 100%
Odkształcenie w kierunku x [μstrain]	SMA - góra	MAX	68,6	44,7	34,7
		MIN	-242	-233	-233
	SMA - dół	MAX	47,3	8,7	10,9
		MIN	-122	-109	-110
	MA - góra	MAX	37,2	6,02	3,89
		MIN	-134	-87,4	-83,2
	MA - dół	MAX	34,7	5,67	4,91
		MIN	-139	-77,1	-67,9
Odkształcenie w 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 naziomie

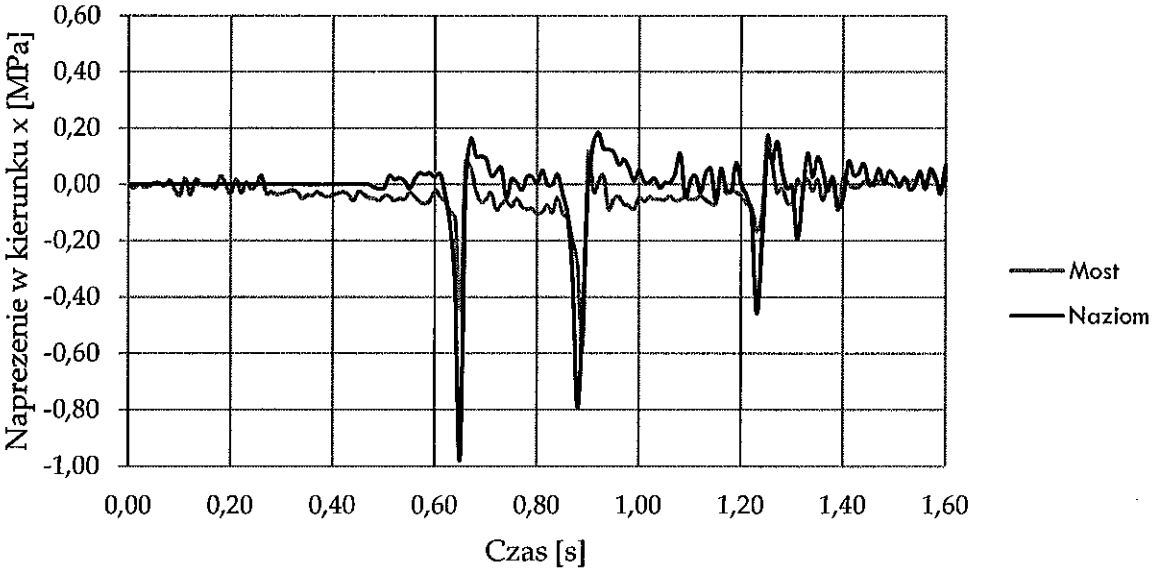
W celu zbadania różnicy pomiędzy zachowaniem nawierzchni drogowej znajdującej się na obiekcie mostowym i na naziomie, przedstawiono porównanie wyników dla modelu o sczepności 100% z wynikami dla takich samych warstw asfaltowych znajdujących się na naziomie. Prezentowane wyniki dotyczą przypadku przejazdu jednego pojazdu członowego z prędkością 60 km/h.

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

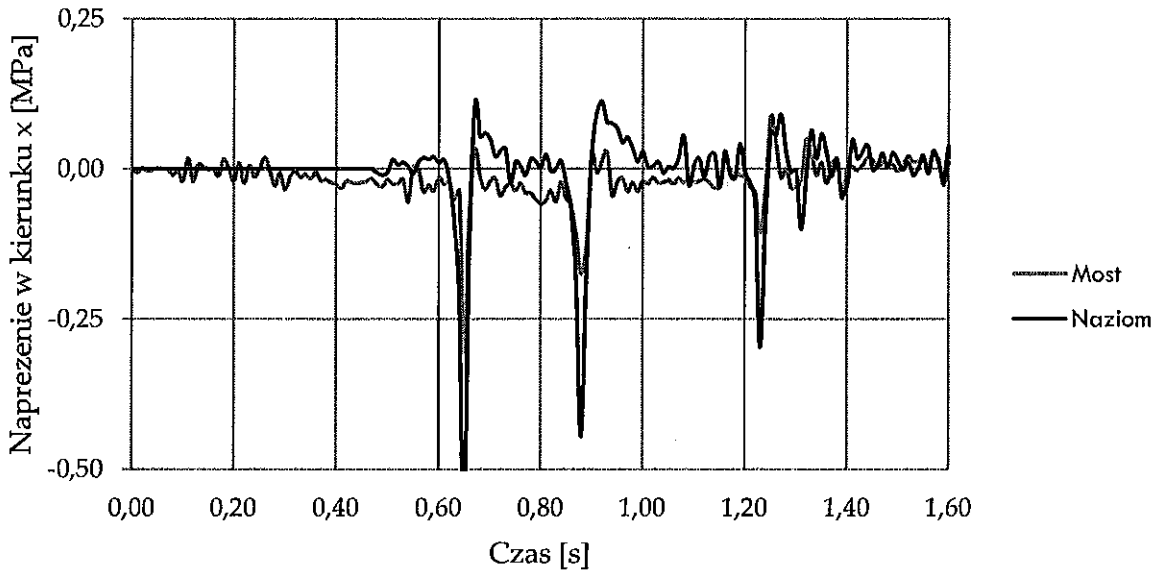
Na Rys. 2-45 do Rys. 2-48 przedstawiono naprężenia w kierunku jazdy pojazdu oznaczone jako σ_x odpowiednio w elementach znajdujących się na górze i dole obu warstw asfaltowych.



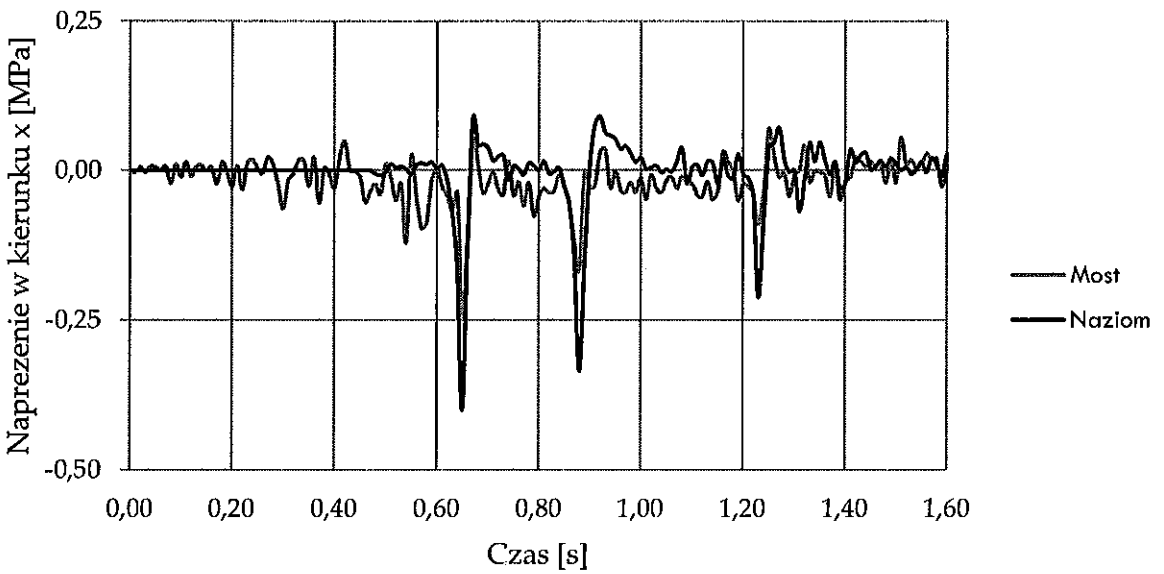
Rys. 2-45. Zmienność w czasie naprężenia σ_x górnego elementu warstwy SMA w kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomie



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

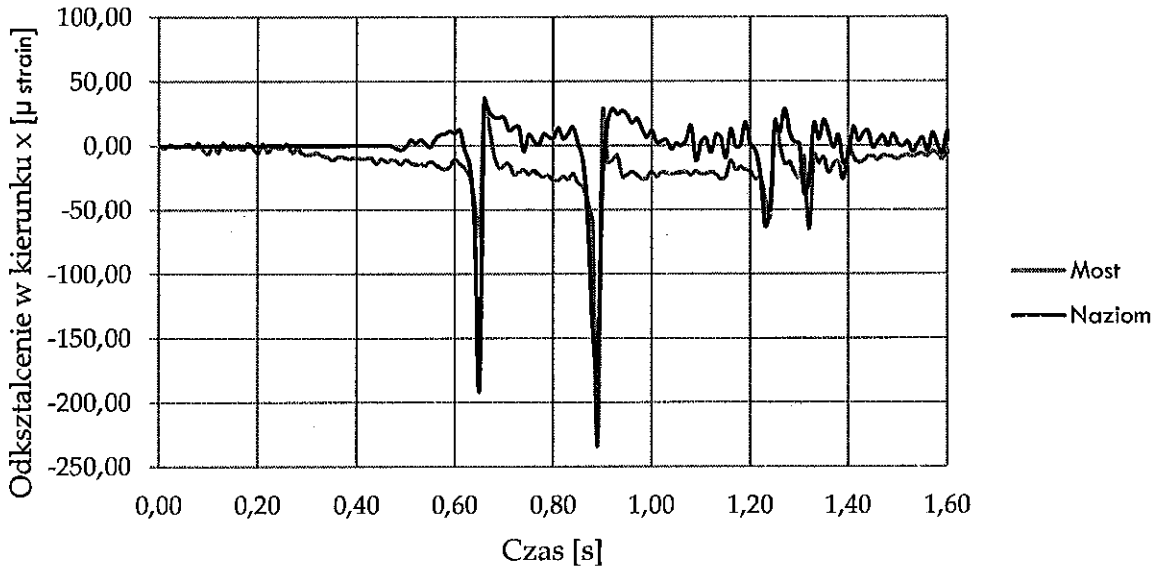


Rys. 2-47. Zmienność w czasie naprężenia σ_x górnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomie

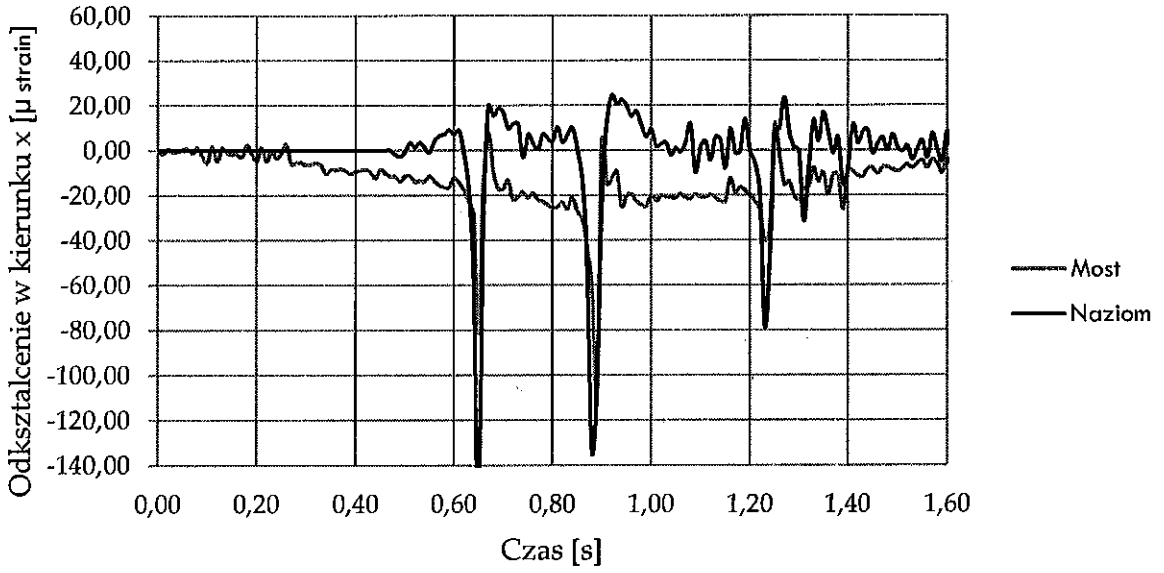


Rys. 2-48. Zmienność w czasie naprężenia σ_x dolnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomie.

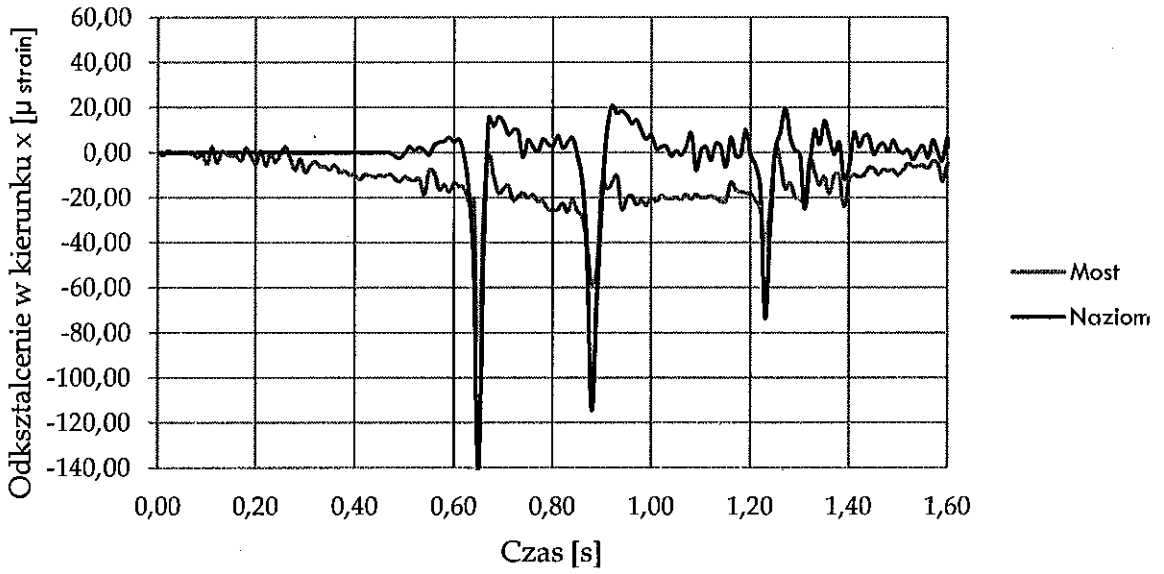
Na Rys. 2-49 do Rys. 2-52 przedstawiono odkształcenia w kierunku ruchu pojazdu oznaczone jako ε_x odpowiednio w górnych i dolnych elementach obu warstw asfaltowych. Przedstawiono wyniki dla nawierzchni znajdującej się na obiekcie mostowym oraz nawierzchni o takim samym układzie warstw asfaltowych znajdującej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



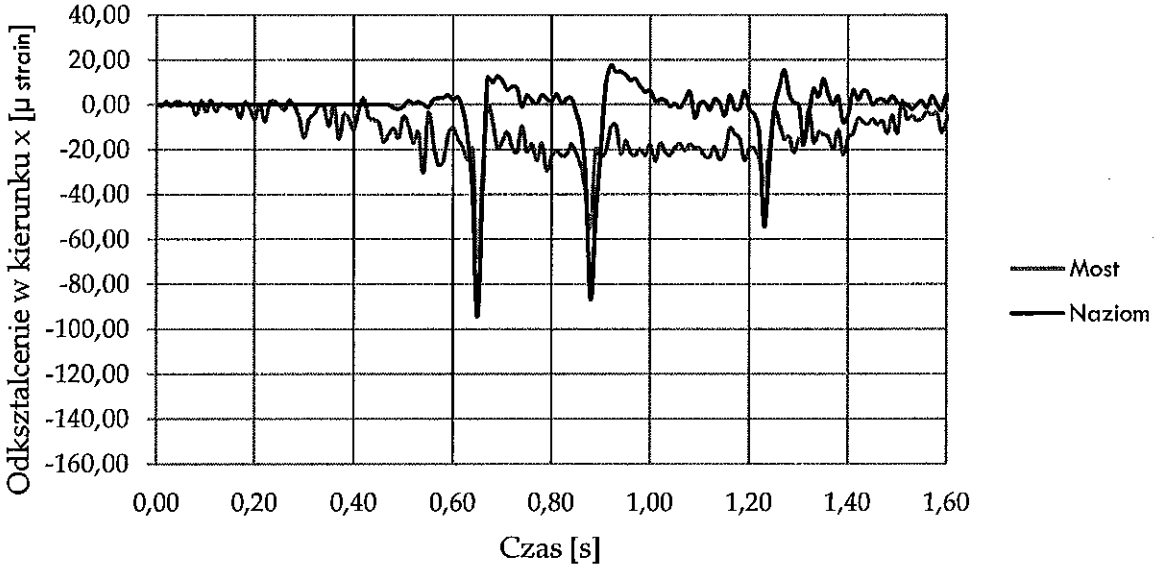
Rys. 2-49. Zmienność w czasie odkształcenia ε_x górnego elementu warstwy SMA w kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomie



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

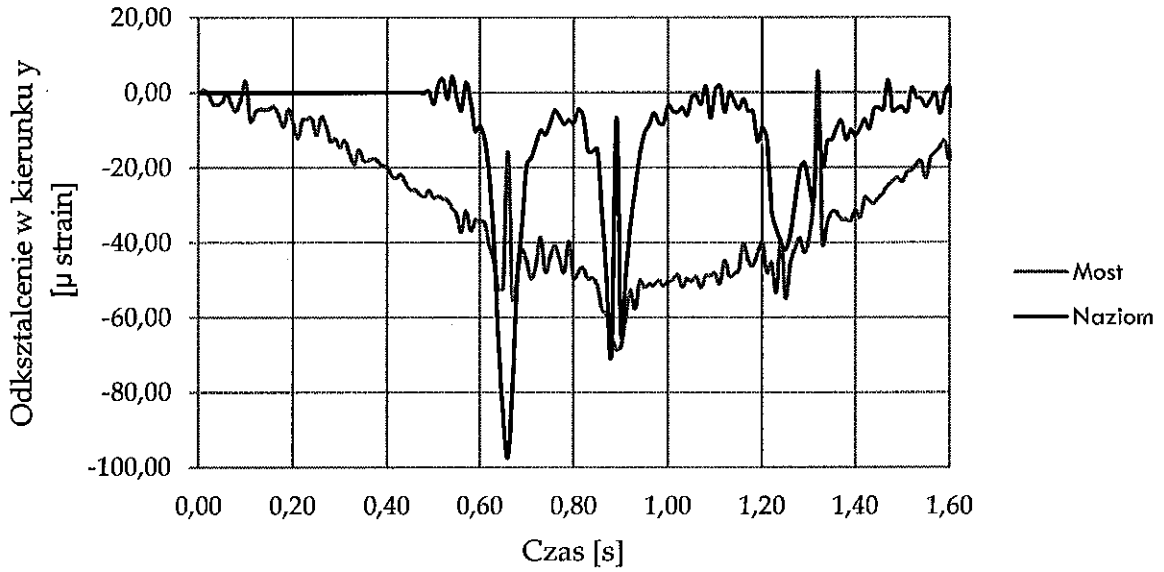


Rys. 2-51. Zmienność w czasie odkształcenia ε_x górnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomie

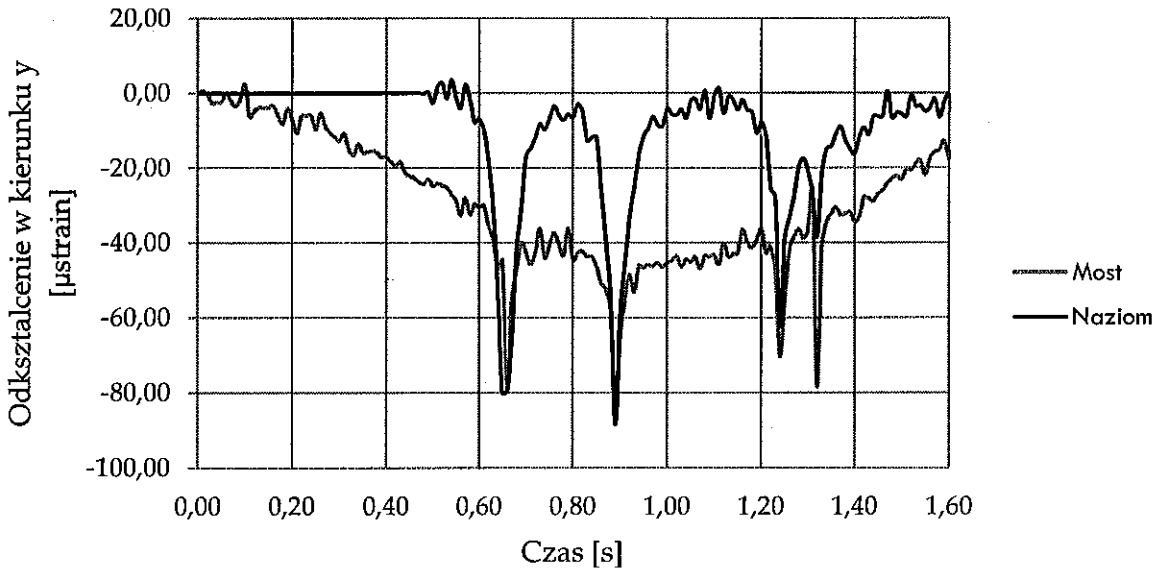


Rys. 2-52. Zmienność w czasie odkształcenia ε_x dolnego elementu warstwy MA w kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomie

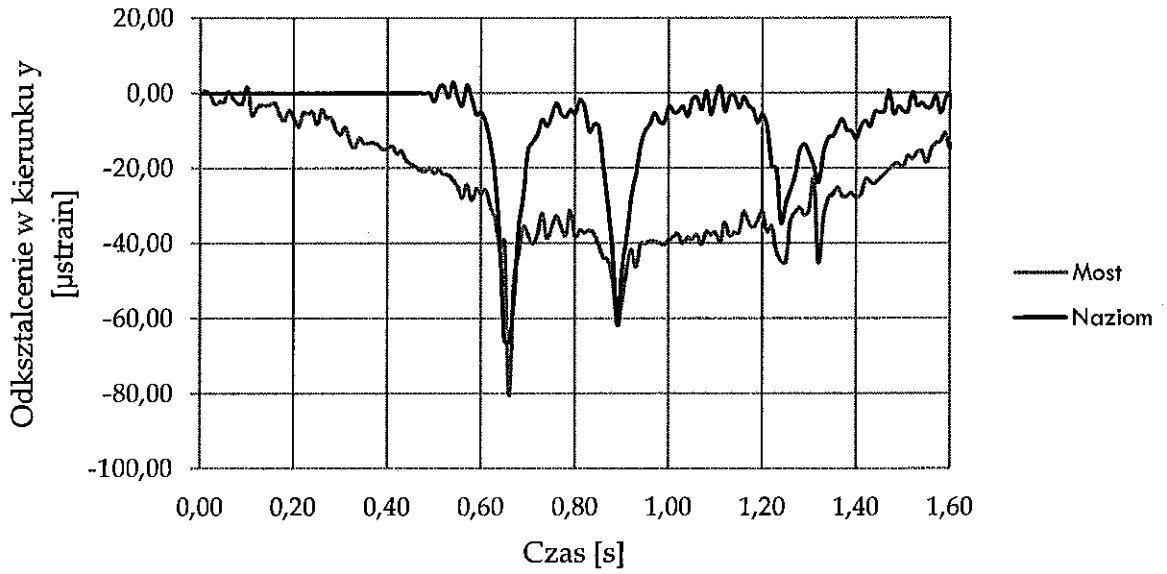
Na Rys. 2-53 do Rys. 2-56 przedstawiono odkształcenia w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu pojazdu, oznaczone jako ε_y w elementach na górze i na dole warstw asfaltowych, dla nawierzchni znajdującej się na obiekcie mostowym oraz dla nawierzchni na naziomie.



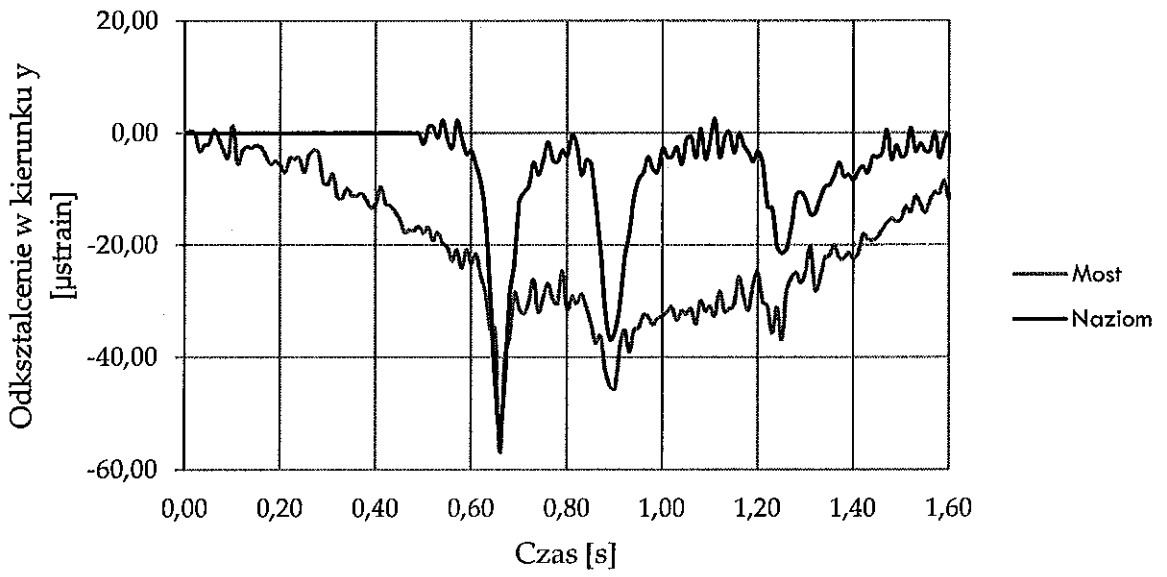
Rys. 2-53. Zmienność w czasie odkształcenia ε_y górnego elementu warstwy SMA w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu pojazdu dla nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomie



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 Tablicy 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

2.2.6 Podsumowanie

W opracowaniu przedstawiono analizę numeryczną modelowania nawierzchni na obiektach mostowych. Szczególny nacisk przyłożono na przeanalizowanie wpływu stopnia sczepności warstw nawierzchni z konstrukcją mostu, oraz zbadanie różnic pomiędzy zachowaniem nawierzchni na obiekcie mostowym i na naziomie. Przeprowadzając analizy dla różnego stopnia sczepności, oraz porównano wyniki dla różnych modeli. Z przedstawionych wyników można wywnioskować, iż stopień sczepności ma znaczący wpływ na wartości odkształceń w nawierzchni mostowej, przez co może wpływać na jej trwałość. Różnica w wynikach dla stopnia sczepności 50% oraz 100% jest niewielka z powodu metody dobrania parametrów sczepności. 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 konstrukcja 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.

PODZIĘKOWANIE

Autorzy opracowania dziękują prof. Jerzemu Wekezerowi za udostępnienie modeli numerycznych mostu i ciężkiego pojazdu, opracowanych przez zespół Crashworthiness and Impact Analysis Laboratory, działający na Florida A & M University - Florida State University College of Engineering w Tallahassee, FL USA.

LITERATURA

[1] Piłat J., Radziszewski P., Kowalski K., (2007) Nawierzchnie asfaltowe I betonowe na obiektach mostowych, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, Lipiec-Sierpień 2007, str. 49-52.

[2] Weil, Gary J. Non Destructive Testing of Bridge, (1992) Highway and Airport Pavements, Gateway Engineer Magazine, 1992, pages 5-7.

[3] Bakht, B. and Jaeger, L. (1990). "Bridge Testing—A Surprise Every Time." Journal od Structural Engineering, 116(5), 1370–1383.

[4] Livermore Software Technology Corporation (LSTC) "*LS-DYNA Keyword User's Manual*", LSTC, 2012.

[5] WIELTON S.A., strona internetowa www.wielton.com.pl.

[6] IVECO, Truck partner, strona internetowa www.truckpartner.iveco.pl.

[7] Szurgott P., Kwasniewski., Wekezer J., (2009) 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.

[8] Szurgott P., Kwasniewski L., Wekezer J.W., (2010) Example of Experimental Validation and Calibration of a Finite Element Model of a Heavy Vehicle, Journalof KONES Powertrain and Transport, vol. 17, no. 1, pp. 433-440.

[9] Malachowski J., Li H., Wekezer J., Kwaśniewski L., (2007) 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.

[10] Kwaśniewski L., Wekezer J., Roufa C., Li H., Ducher J., Malachowski J., (2006) Experimental evaluation of dynamic effects for a selected highway bridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, vol. 20, no. 3, pp. 253-260.

[11] Nagórska M., (2010) 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.

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,
- sfalowania 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 lepiszcza, w postaci plamy na nawierzchni, powstały w wyniku miejscowego nadmiaru lepiszcza w mieszance mineralno-asfaltowej.

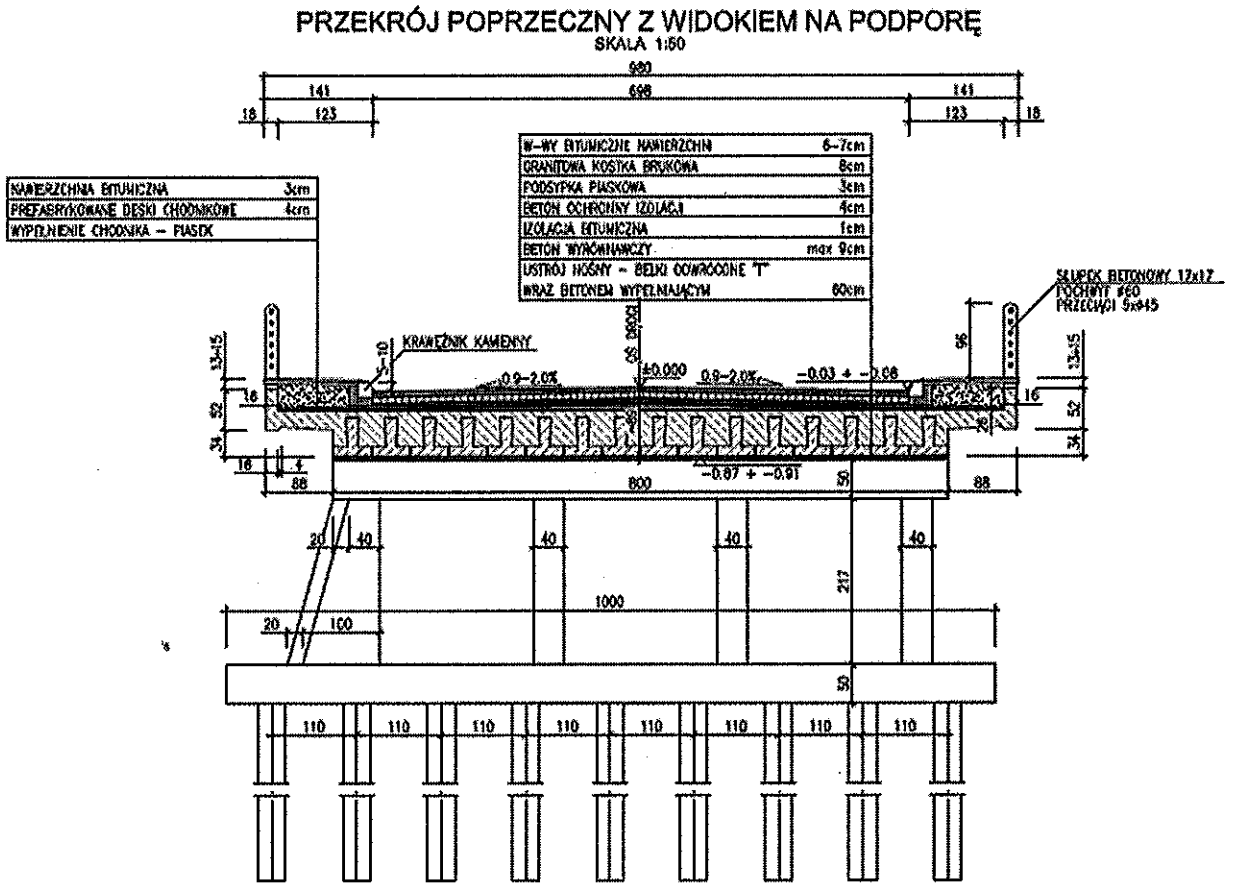
Zniszczenia powstałe w warstwach nawierzchni mostowej mogą powodować uszkodzenie hydroizolacji w postaci utraty częściowej lub całkowitej przyczepności do podłoża, utraty sczepności między izolacją a warstwą ochronną, wzrostu nasiąkliwości izolacji powyżej 5%, uszkodzeń izolacji w wyniku pęknięcia, przebicia,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

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.

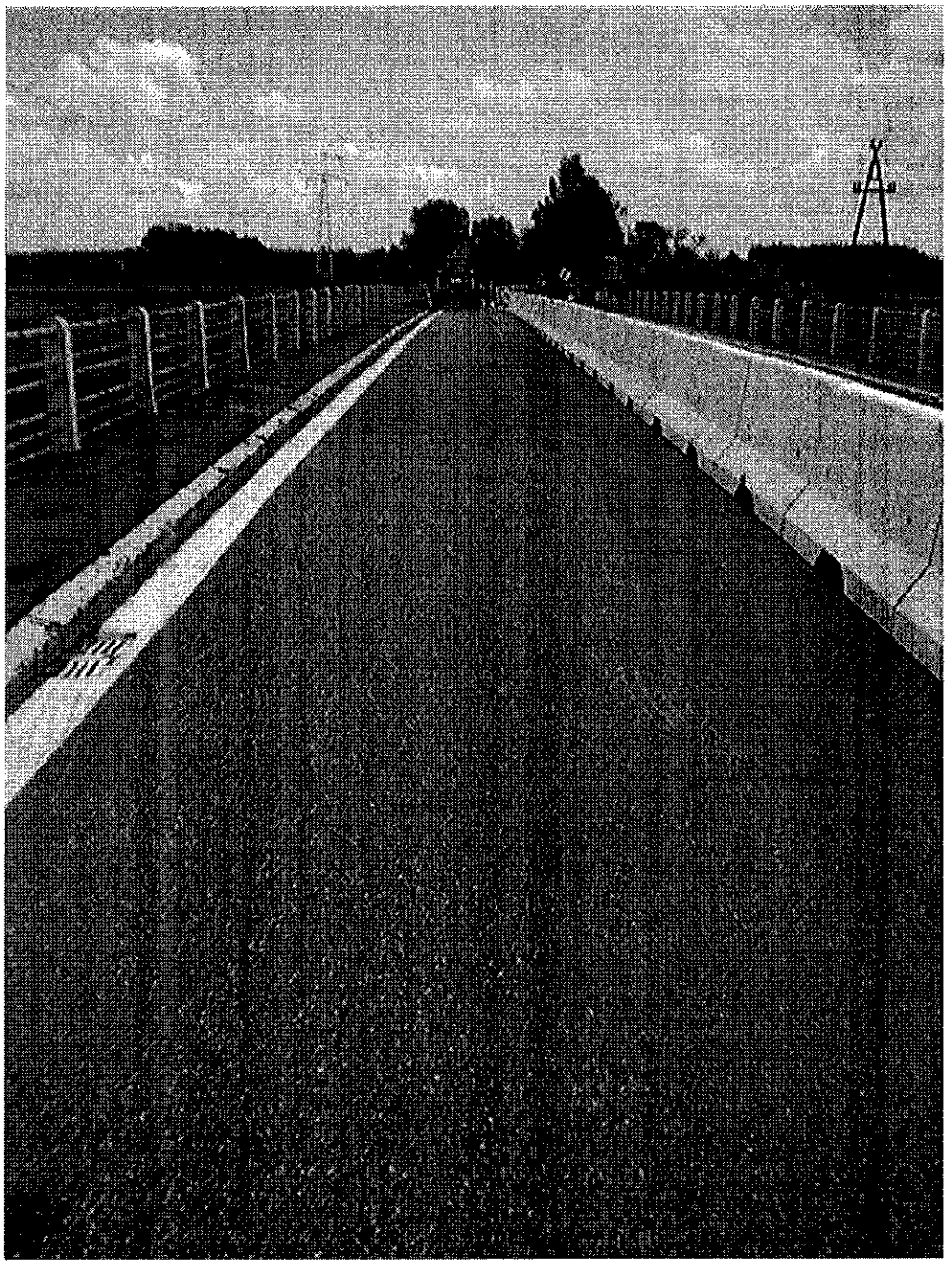
Na rys. 3-1 przedstawiono układ istniejących warstw konstrukcyjnych nawierzchni, chodników oraz przekrój konstrukcji obiektu mostowego. Początkowo nawierzchnia na obiekcie mostowym była wykonana z kostki granitowej na podsypce piaskowej, warstwy ochronnej izolacji z betonu cementowego oraz papy smołowej,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



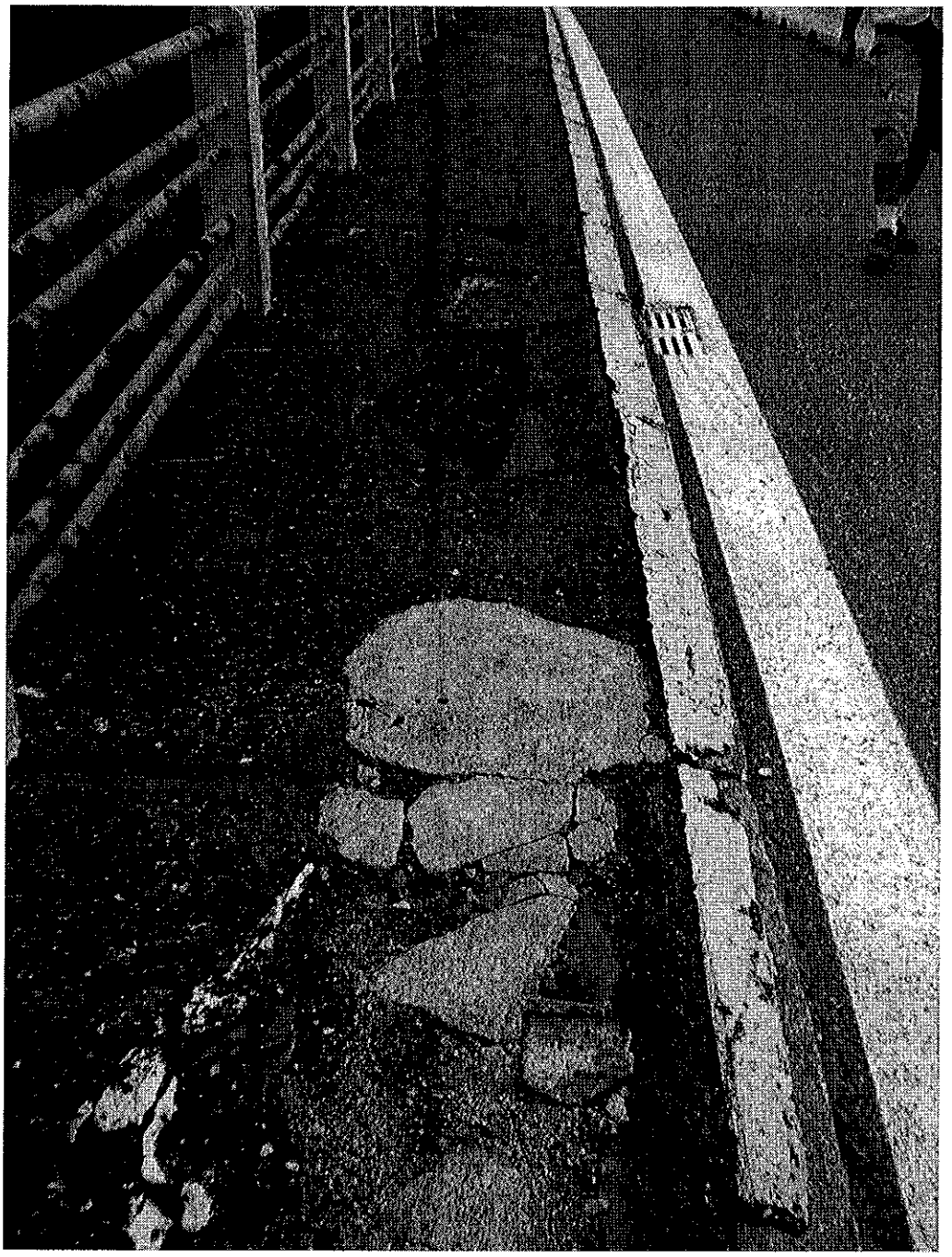
Rys. 3-1. Przekrój poprzeczny konstrukcji mostu w Sztabinie

Konstrukcję nawierzchni chodnika stanowi nawierzchnia asfaltowa grubości 3 cm położona na betonowych 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 3-3.

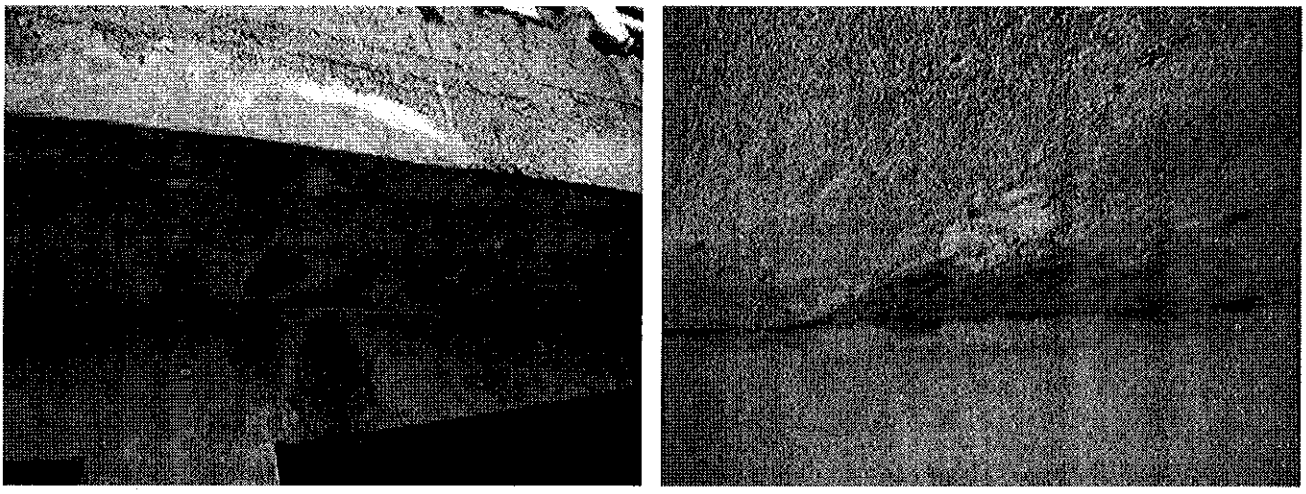


Rys.3-2. Nawierzchnia jezdni na moście w Sztabinie



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).



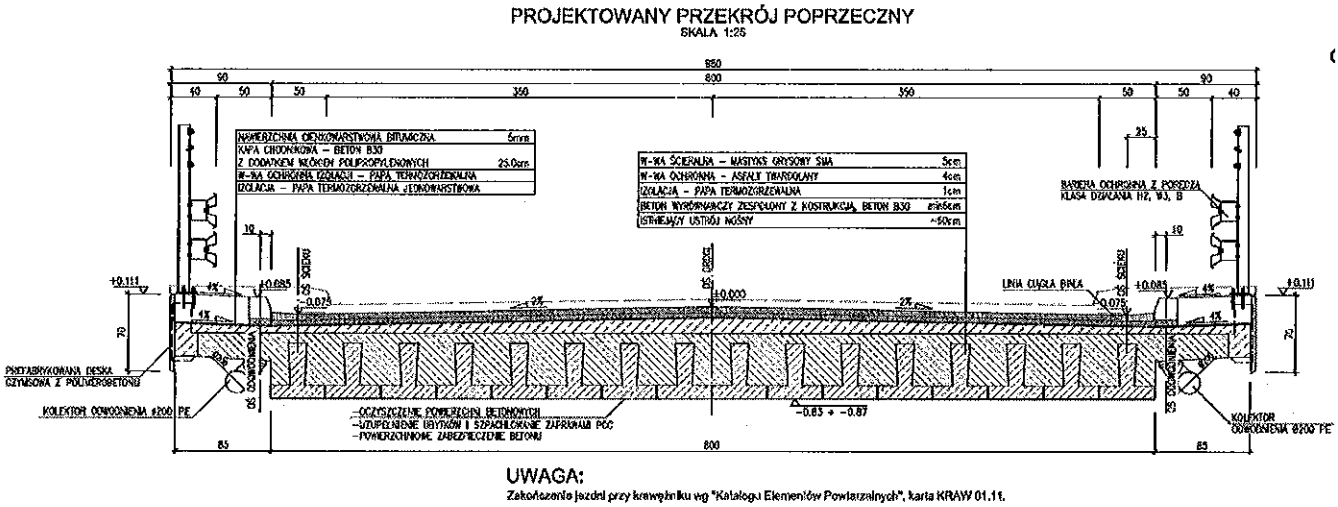
Rys. 3-4. Przykłady zniszczeń dolnej powierzchni płyty betonowej mostu na Biebrzy

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. Odkrywka istniejącej konstrukcji nawierzchni warstw: kostki granitowej, posypki piaskowej, betonu ochronnego i izolacji z papy smołowej

Odkrywka wykazała 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

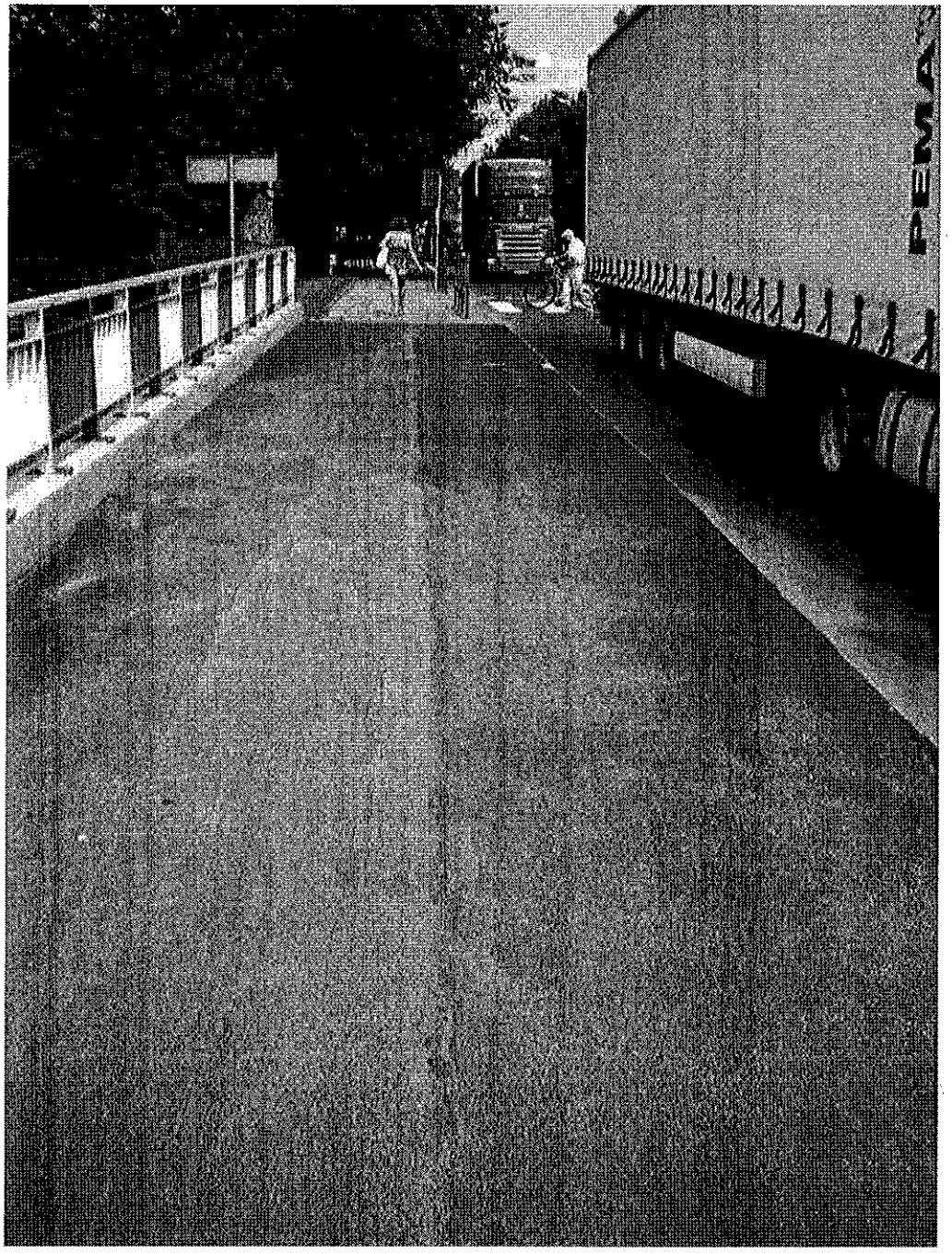
Zaprojektowany układ warstw konstrukcji nawierzchni na moście w Sztabinie należy uznać za typowe rozwiązanie pod względem konstrukcji oraz zastosowanych materiałów. Zastosowana jako izolacja pomostu betonowego papa termozgrzewalna należy do najczęściej stosowanych obecnie materiałów do izolacji mostów. Warstwa ochronna z asfaltu lanego i warstwa ścieralna z grysu asfaltowego 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 izolacjonawierzchni jest rozwiązanie przyjęte na kładce stalowe nad Kanałem Augustowskim jako nawierzchni chodnika i ścieżki rowerowej. Nawierzchnia została wykonane w technologii izolacjonawierzchni z zastosowaniem żywicy epoksydowej (Rys. 3-7).

Innym przykładem cienkiej nawierzchni na obiekcie mostowym z pomostem betonowym jest nawierzchnia powłokowa asfaltowo-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. Izolacjonawierzchnia poliuretanowa - widok ogólny powierzchni chodnika, prawidłowo wykonane połączenie nawierzchni z krawężnikiem



Rys. 4-8. Izolacjonawierzchnia 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 28 mm, żeber podłużnych i poprzecznych. Grubość blachy płyty chodnikowej wynosi 12 mm, zaś w okolicach dylatacji zwiększa się do 14 mm.

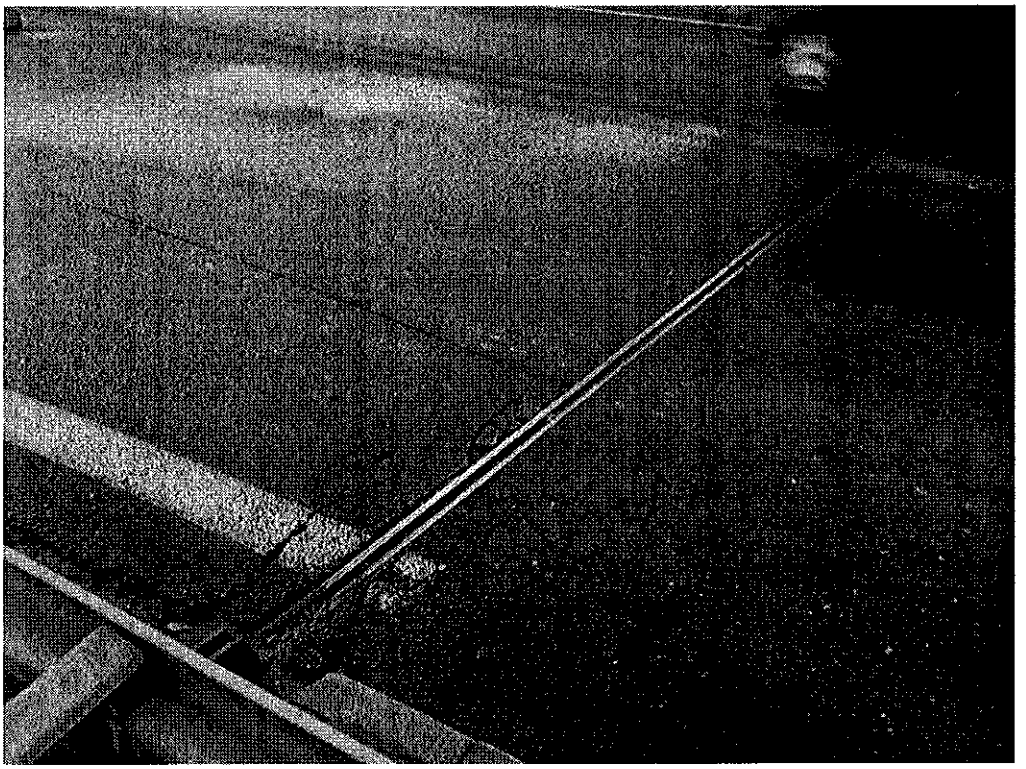
Istniejąca nawierzchnia składa się z dwuwarstwowej nawierzchni asfaltowej ułożonej na izolacji z mastyksu. Sumaryczna grubość obu warstw jest zmienna i wynosi dla mostu północnego średnio 128 mm, dla mostu południowego 134 mm. W warstwie asfaltowej znajduje się siatka z prętów o średnicy Ø8 mm przyspawana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

Ocena stanu nawierzchni mostu

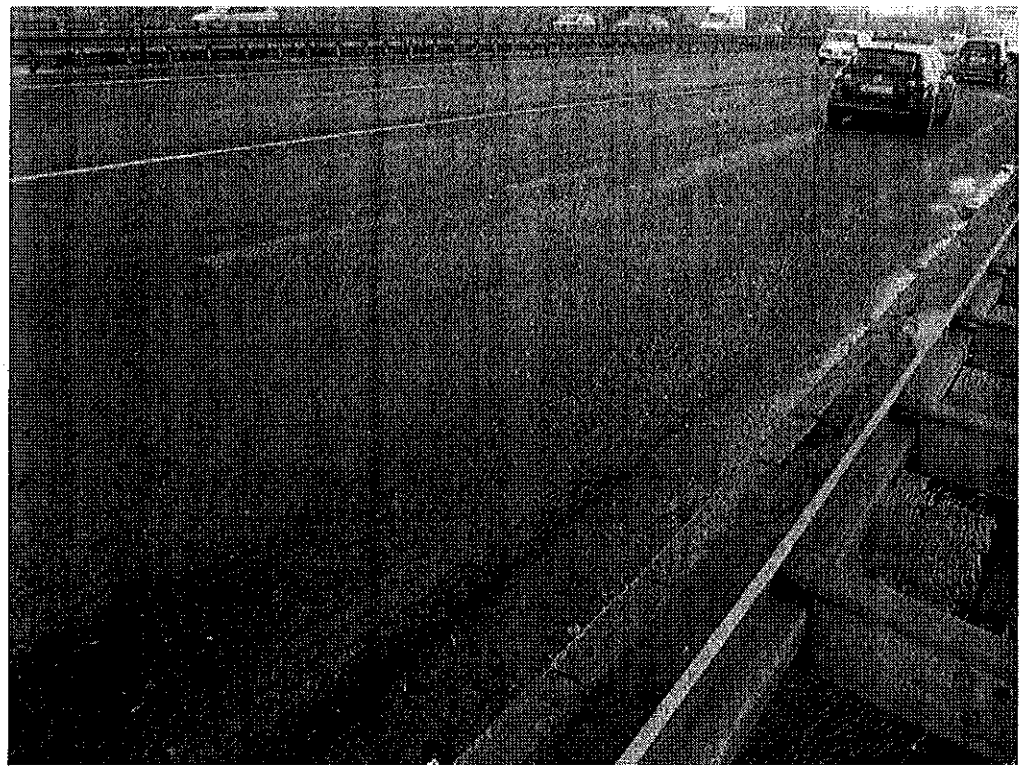
Wizualną ocenę stanu nawierzchni przeprowadzono w październiku 2012 roku. Porównując stan nawierzchni jezdni południowej (kierunek Żoliborz – Praga) ze stanem nawierzchni jezdni północnej należy stwierdzić, że znacząco mniej zniszczeń występuje na nawierzchni jezdni północnej.

Na nawierzchni jezdni południowej występują następujące zniszczenia:

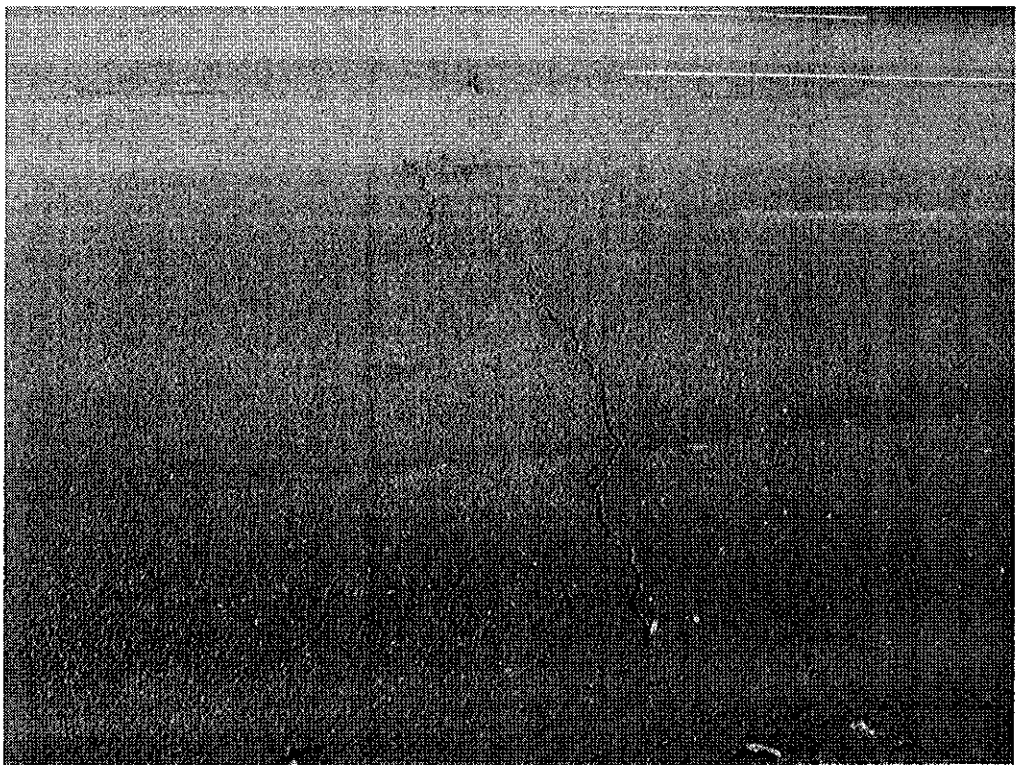
- spękania siatkowe w obrębie dylatacji (Rys. 3-9),
- koleiny i fałdy przykrawędziowe ze spękaniami siatkowymi (Rys. 3-10),
- spękania poprzeczne (Rys. 3-11),
- spękanie podłużne (Rys. 3-12),
- łata ze spękaniami oraz spękania siatkowe w obrębie kratki ściekowej (Rys. 3-13).



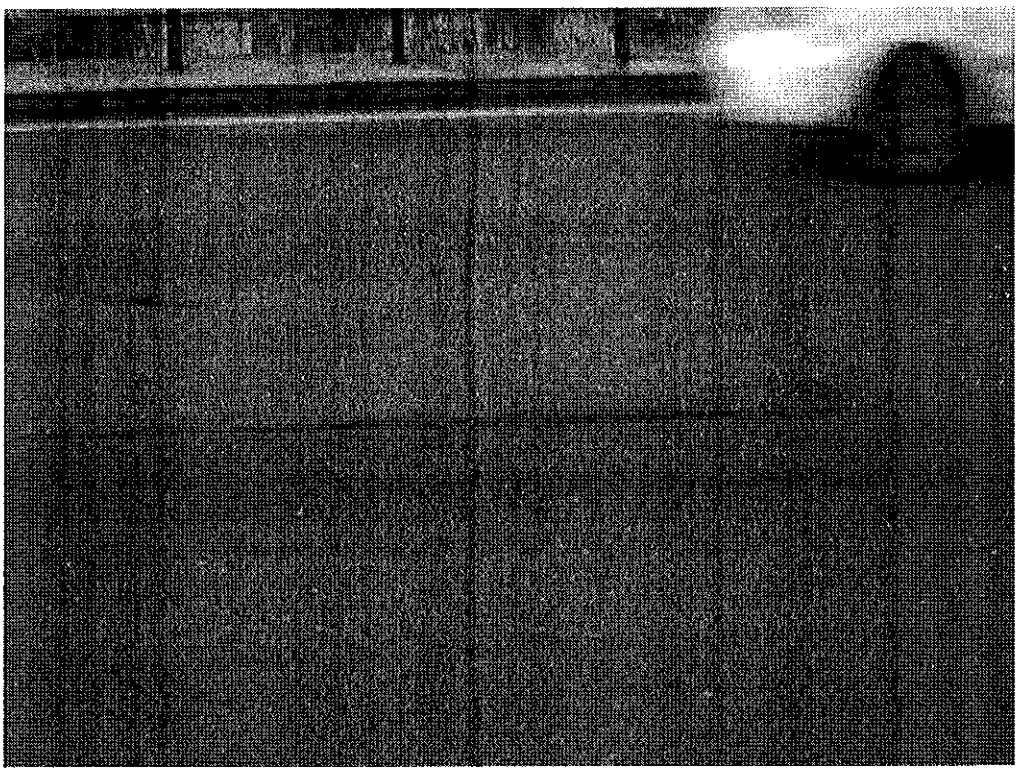
Rys. 3-9. Spękania siatkowe w obrębie dylatacji



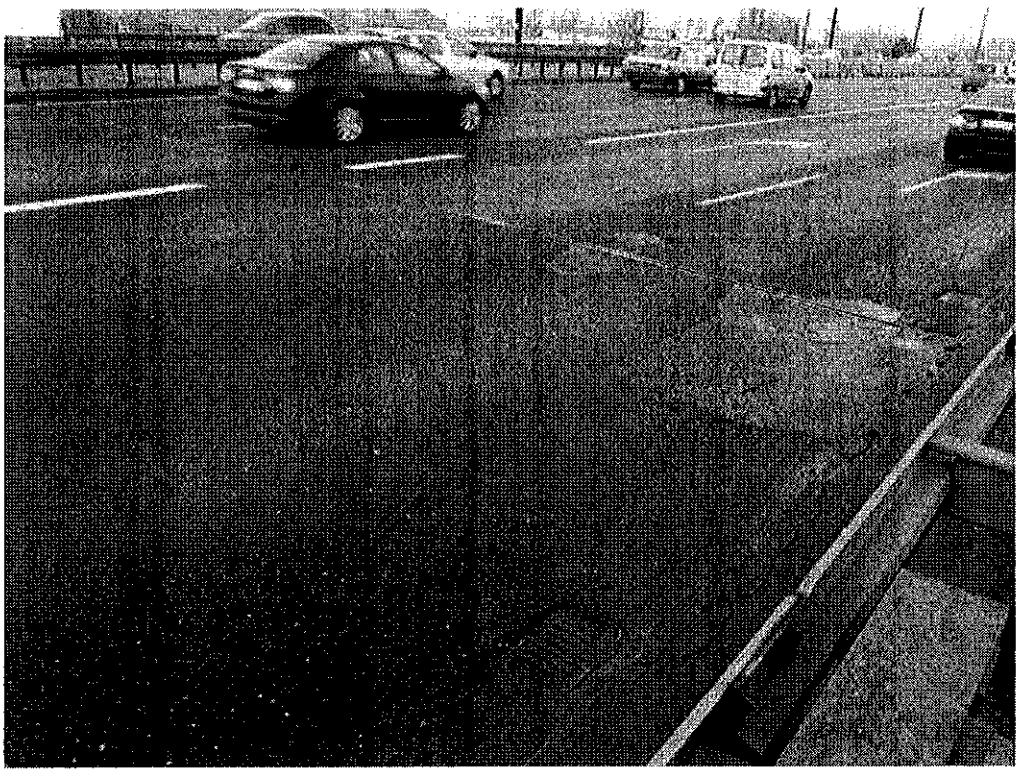
Rys. 3-10. Koleiny i fałdy przykrawędziowe ze spękaniami siatkowymi



Rys. 3-11. Spękania poprzeczne



Rys. 3-12. Spękanie podłużne



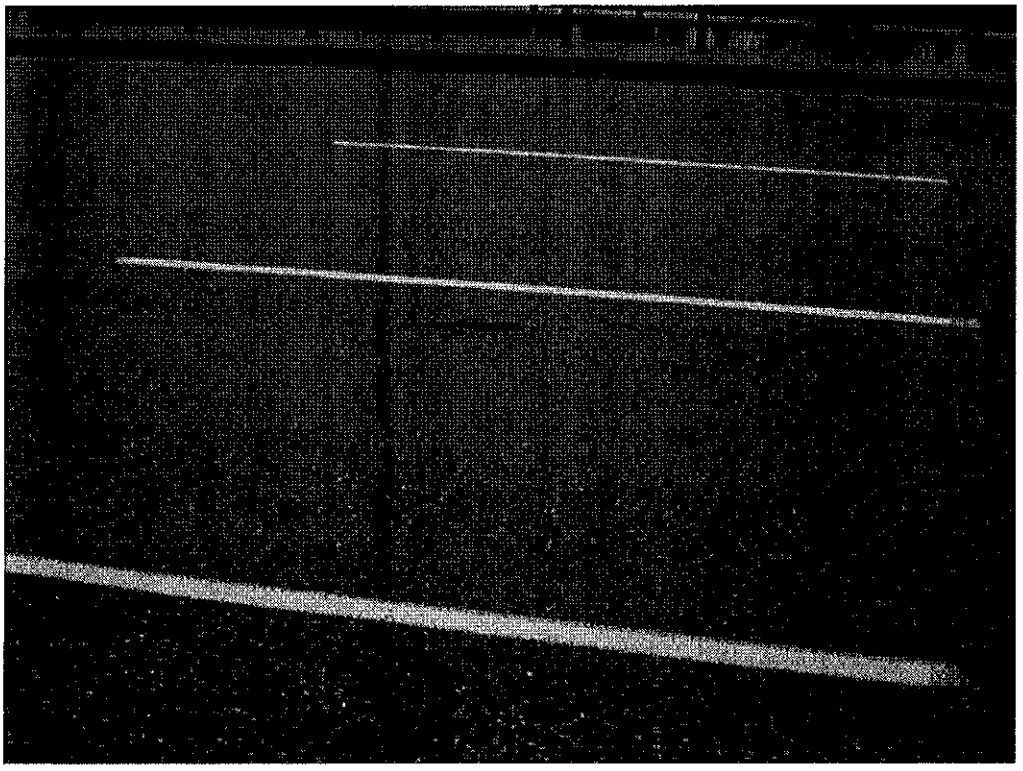
Rys. 3-13. Łata ze spękaniami oraz spękania siatkowe w obrębie kratki ściekowej

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 łata 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 spękaniami siatkowymi. Przyczyną tych zniszczeń najprawdopodobniej jest częściowa utrata wiązań międzywarstwowych w połączeniu z podłożem, izolacją i warstwami nawierzchni, przy występującym bardzo dużym obciążeniem ciężkich pojazdów samochodowych.

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

Realizacja zadania 4 przewiduje badania lepiszczy, pap termozgrzewalnych oraz mieszanek mineralno-asfaltowych, których właściwości będą porównywane w funkcji wysokiej temperatury technologicznej. W dalszej części etapu prac badawczych (zadanie 5) przewiduje się ocenę 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 · 0,1 mm do 220 · 0,1 mm określa norma PN-EN 12591 (Tablica 4-1A i Tablica 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: –40°C, maksymalna temperatura produkcji asfaltu lanego: 220°C). W celu przeprowadzenia oceny właściwości asfaltu w szerokim zakresie temperatur użytkowych należy, poza badaniami podstawowymi, określić właściwości reologiczne, 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 12591:2012

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	0,1 mm	20 – 30	35 – 50	50 – 70	70 – 100	100 – 150	160 – 220
Temperatura mięknienia	EN 1427	°C	55 – 63	50 – 58	46 – 54	43 – 51	39 – 47	35 – 43
Odporność na starzenie w 163 °C	EN 12607-1							
Pozostała penetracja		%	≥ 55	≥ 53	≥ 50	≥ 46	≥ 43	≥ 37
Wzrost temperatury mięknienia		°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	°C	≥ 240	≥ 240	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 220
Rozpuszczalność	EN 12592	% (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 12591:2012

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	-	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Lepkość dynamiczna w 60 °C	EN 12596	Pa · s	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Temperatura łamliwości wg Fraassa	EN 12593	°C	NR	≤ - 5	≤ - 8	≤ - 10	≤ - 12	≤ - 15
Lepkość kinematyczna w 135 °C	EN 12595	mm^2/s	NR	NR	NR	NR	NR	NR

NR – (*No Requirement*) – oznacza brak wymagań.

Norma PN-EN 14023:2012 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Zasady klasyfikacji asfaltów modyfikowanych polimerami" 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" NPD (No Performance Determined) – właściwość użytkowa nie oznaczana – może być przyjęta, gdy do danego przewidywanego zakresu zastosowania nie podlega wymaganiom kontroli,
- klasa „1" TBR (To Be Reported) – oznacza brak wymagań, ale producent jest proszony o dostarczenie informacji odnośnie właściwości,
- klasy od 2 do 10 – są klasami z konkretnymi wymaganiami liczbowymi.

W tablicy 4-2 przedstawiono wymagania dla asfaltów modyfikowanych polimerami (PmB) przeznaczonych do stosowania w budownictwie drogowym w Polsce wg PN-EN 14023:2012.

Tablica 4-2. Wymagania dotyczące asfaltów modyfikowanych polimerami przeznaczonych do stosowania w Polsce w budownictwie drogowym wg PN-EN 14023:2012

	Metoda badania		Jednostka	Rodzaj asfaltu modyfikowanego polimerami													
				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	
				zakres	klasa	zakres	klasa	zakres	klasa	zakres	klasa	zakres	klasa	zakres	klasa	zakres	klasa
Właściwości podstawowe	Penetracja w 25°C	PN-EN 1426	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 mięknienia	PN-EN 1427	°C	≥ 65	5	≥ 60	6	≥ 55	7	≥ 65	5	≥ 60	6	≥ 45	9	≥ 40	10
	Siła rozciągania	PN-EN 13589 PN-EN 13703	J/cm2	≥ 2 w 10°C	6	≥ 1 w 5°C	4	≥ 1 w 5°C	4	≥ 2 w 5°C	3	≥ 1 w 5°C	4	≥ 1 w 5°C	4	TBR w 5°C	1
	Zmiana masy po starzeniu	PN-EN 12607-1	% m/m	≤ 0,5	3	≤ 3,5	3	≤ 3,5	3	≤ 3,5	3	≤ 3,5	3	≤ 3,5	3	≤ 3,5	3
	Pozostała penetracja w 25°C po starzeniu	PN-EN 12607-1 PN-EN 1426	%	≥ 60	7	≥ 60	7	≥ 60	7	≥ 60	7	≥ 60	7	≥ 50	5	≥ 50	5
	Wzrost temp. mięknienia po starzeniu	PN-EN 12607-1 PN-EN 1427	°C	≤ 8	2	≤ 8	2	≤ 8	2	≤ 8	2	≤ 10	3	≤ 10	3	≤ 10	3
	Temperatura zapłonu	EN ISO 2592	°C	≥ 235	3	≥ 235	3	≥ 235	3	≥ 235	3	≥ 235	3	≥ 235	3	≥ 235	3
Właściwości dodatkowe	Temperatura łamliwości	PN-EN 12593	°C	≤ -5	3	≤ -10	5	≤ -12	6	≤ -15	7	≤ -15	7	≤ -18	8	≤ -20	9
	Nawrót sprężysty w 25°C	PN-EN 13398	%	≥ 50	5	≥ 50	5	≥ 50	5	≥ 50	5	≥ 50	5	≥ 50	5	≥ 50	5
	Przedział Plastyczności	PN-EN 14023	°C	TBR	1	TBR	1	TBR	1	TBR	1	TBR	1	TBR	1	TBR	1
	Stabilność składowania -różnica w temp. mięknienia	PN-EN 13399 PN-EN 1427	°C	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 5	2
	Spadek temp. mięknienia po starzeniu	PN-EN 12607-1 PN-EN 1427	°C	TBR	1	TBR	1	TBR	1	TBR	1	TBR	1	TBR	1	TBR	1
	Nawrót sprężysty w 25°C po starzeniu	PN-EN 12607-1 PN-EN 13398	%	≥ 50	4	≥ 50	4	≥ 50	4	≥ 50	4	≥ 50	4	≥ 50	4	≥ 50	4

TBR – (To Be Reported) – wynik badania podawany przez producenta, brak wymagania
NPD – (No Performance Determined) – właściwość nie określana

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 tablicy 4-3. W tablicy 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 tablicy 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

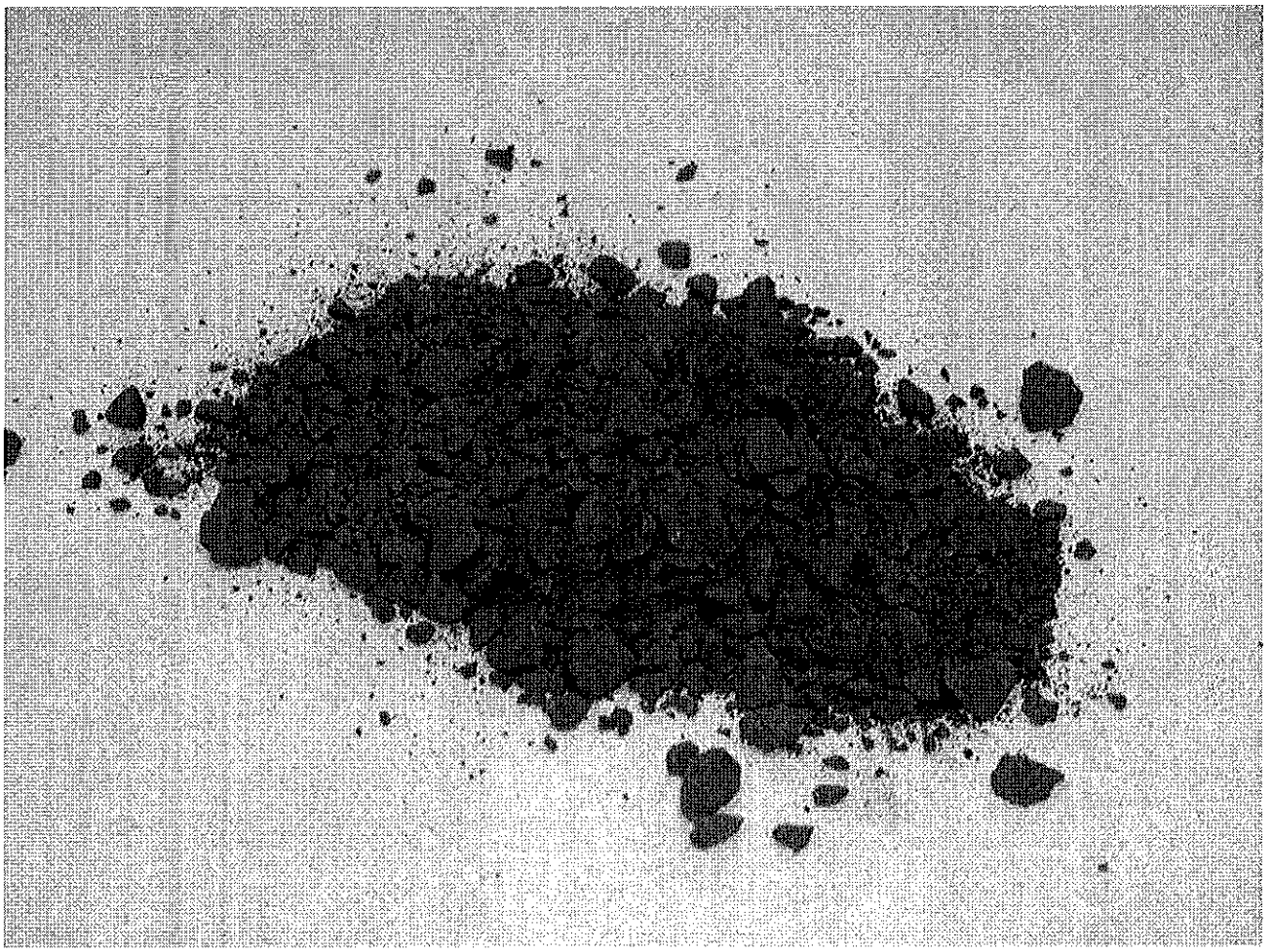
Tablica 4-4. Lepiszcza do izolacji i nawierzchni mostowych

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 lepkosprężystości, co oznacza, że zachowują elastyczność w czasie ich użytkowania w szerokich granicach temperatury. Powyższe właściwości odgrywają szczególną rolę w czasie eksploatacji asfaltowych izolacji i nawierzchni mostowych w polskiej strefie klimatycznej, wpływając na ich trwałośc. 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 [1,

2, 3]. 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 [3, 4].



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

Modyfikację asfaltów drogowych dodatkiem asfaltu naturalnego Trnidad 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 Tablicy 4-5 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 zgodne z wymaganiami normy PN-EN 12591 a badania lepiszczy modyfikowanych polimerami wykonano zgodne z normą PN-EN 14023. 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.

Wykonano badania lepkości dynamicznej próbek nie wygrzewanych oraz poddanych wygrzewaniu. 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,
- pomiar temperatury mięknienia wg PiK wg PN-EN 1427,
- określenie lepkości dynamicznej Brookfielda w temperaturze 60°C, 90°C, 110°C i 135°C wg PN-EN 12596.

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 Tablicach 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 ISpen25 obliczono na podstawie wzoru:

$$ISpen25 = \frac{Pen25(200; 250; 300°C)}{Pen25} \tag{6}$$

gdzie:

$Pen25(200; 250; 300°C)$ – penetracja po wygrzewaniu w temp. 200, 250, 300°C określona w 25°C, [· 0,1 mm],

$Pen25$ – penetracja przed wygrzewaniem określona w 25°C, [· 0,1 mm].

Indeks zmiany konsystencji ISTPiK obliczono na podstawie wzoru:

$$ISTPiK = \frac{TPiK(200; 250; 300°C)}{TPiK} \tag{7}$$

gdzie:

$TPiK(200; 250; 300°C)$ – temperatura mięknienia po wygrzewaniu w temp. 200, 250, 300°C, [°C],

TPiK – temperatura mięknienia przed wygrzewaniem, [°C].

Indeks stwardnienia obliczono na podstawie wzoru:

$$ISlepkości = \frac{\eta'(200; 250; 300°C)}{\eta} \tag{8}$$

gdzie:

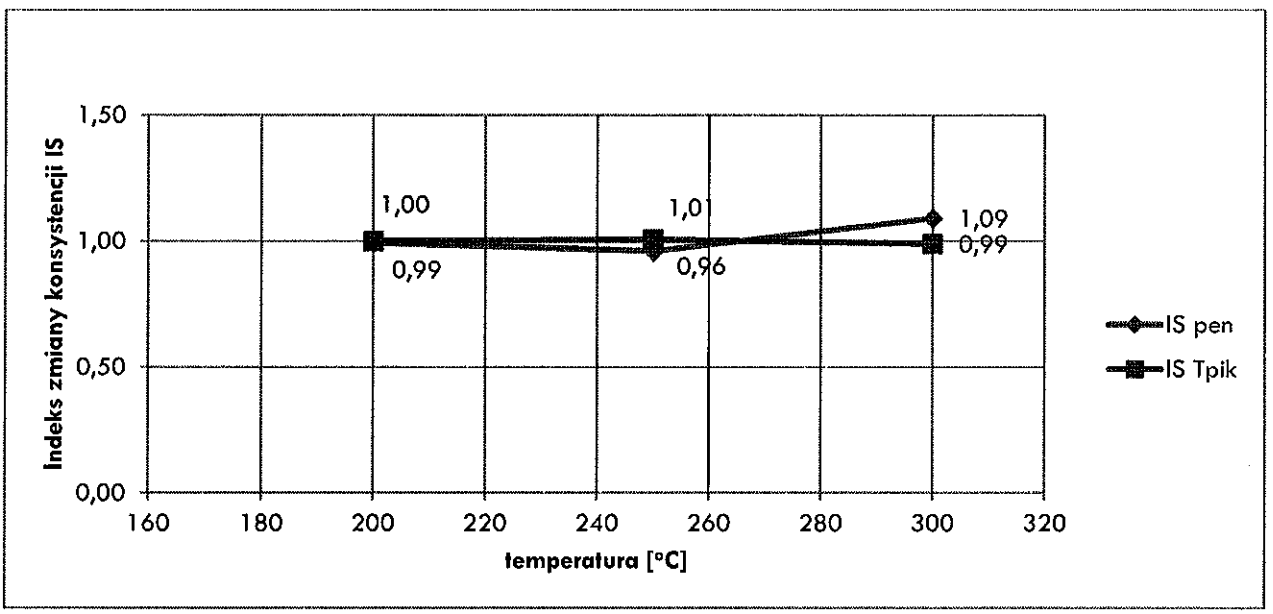
$\eta'(200; 250; 300°C)$ – lepkość dynamiczna po wygrzewaniu w temp. 200, 250, 300°C, [Pa·s],

η – lepkość dynamiczna przed wygrzewaniem, [Pa·s].

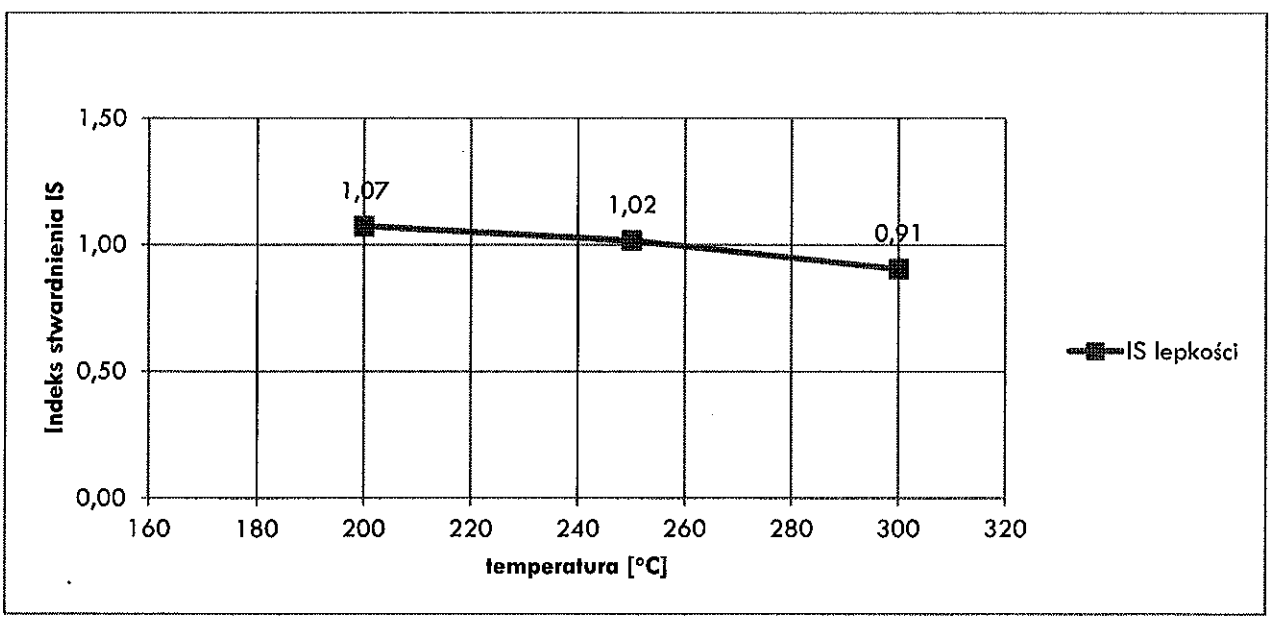
Tablica 4-5. Wyniki badań asfaltu 50/70 do izolacji i nawierzchni mostowych

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 mięknienia 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 lepiszcza

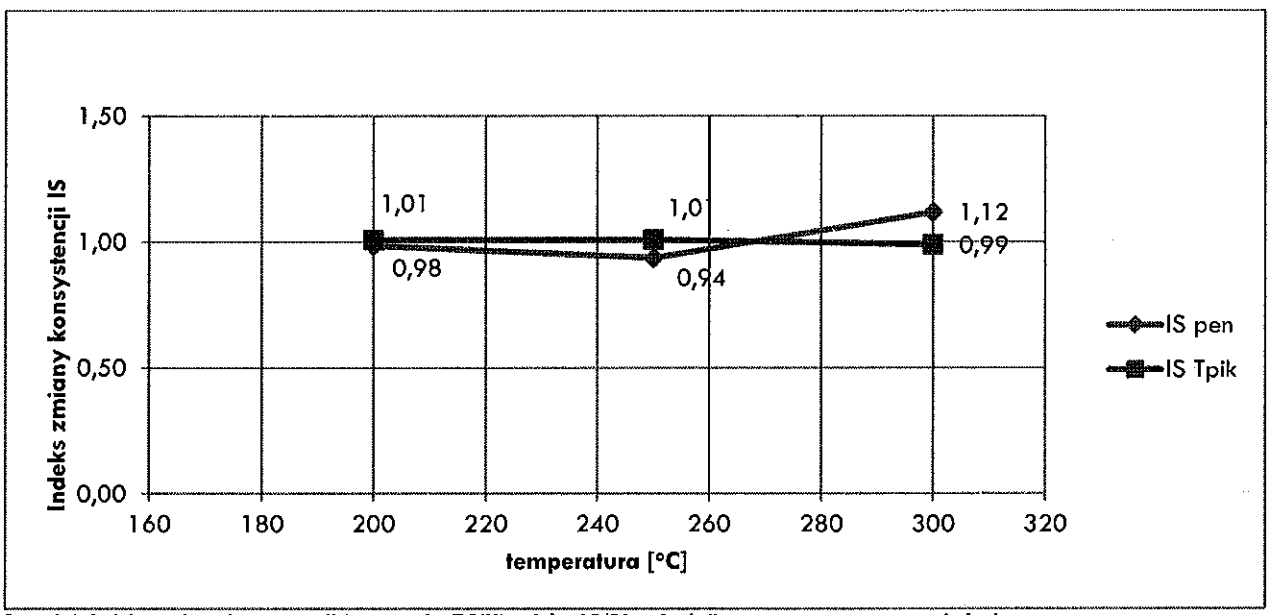


Rys. 4-3. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu 50/70 w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

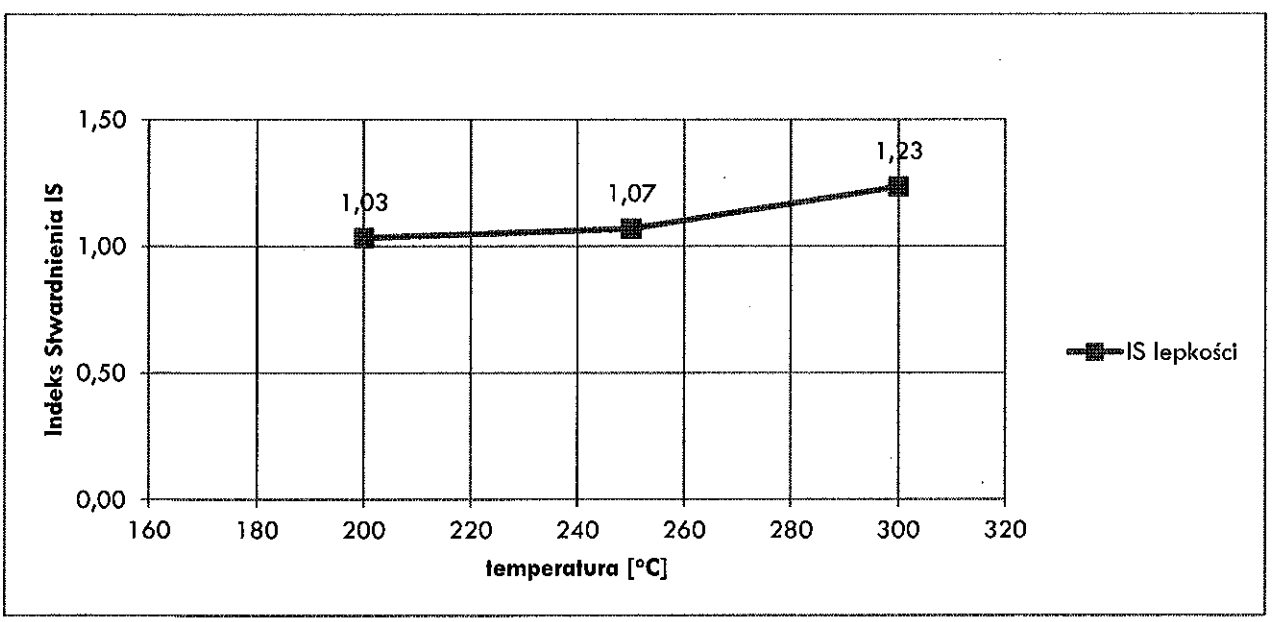
Tablica 4-6. Wyniki badań asfaltu 35/50 do izolacji i nawierzchni mostowych

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 mięknienia 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 lepiszcza

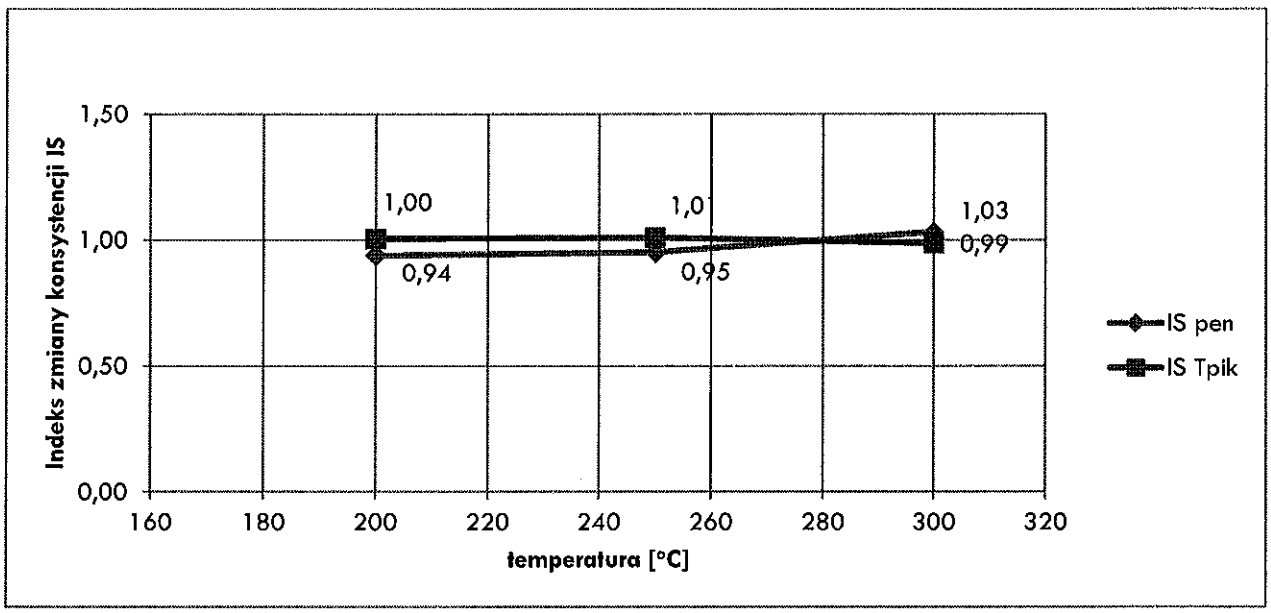


Rys. 4-5. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu 35/50 w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

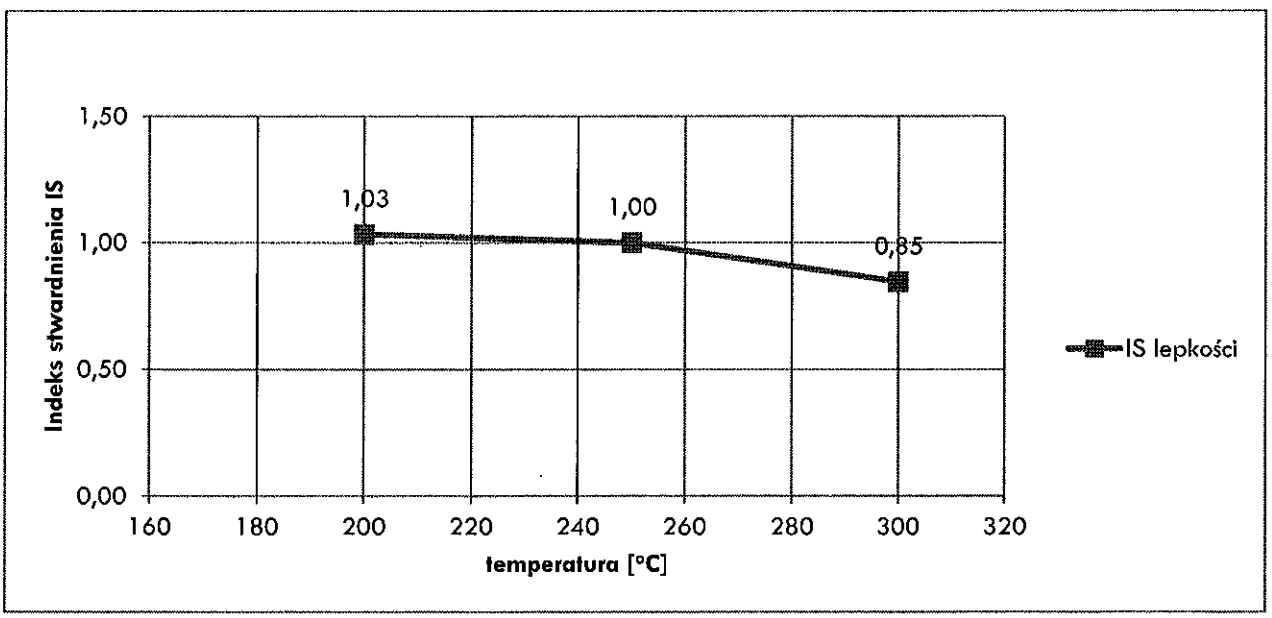
Tablica 4-7. Wyniki badań asfaltu 20/30 do izolacji i nawierzchni mostowych

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 mięknienia 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 lepiszcza

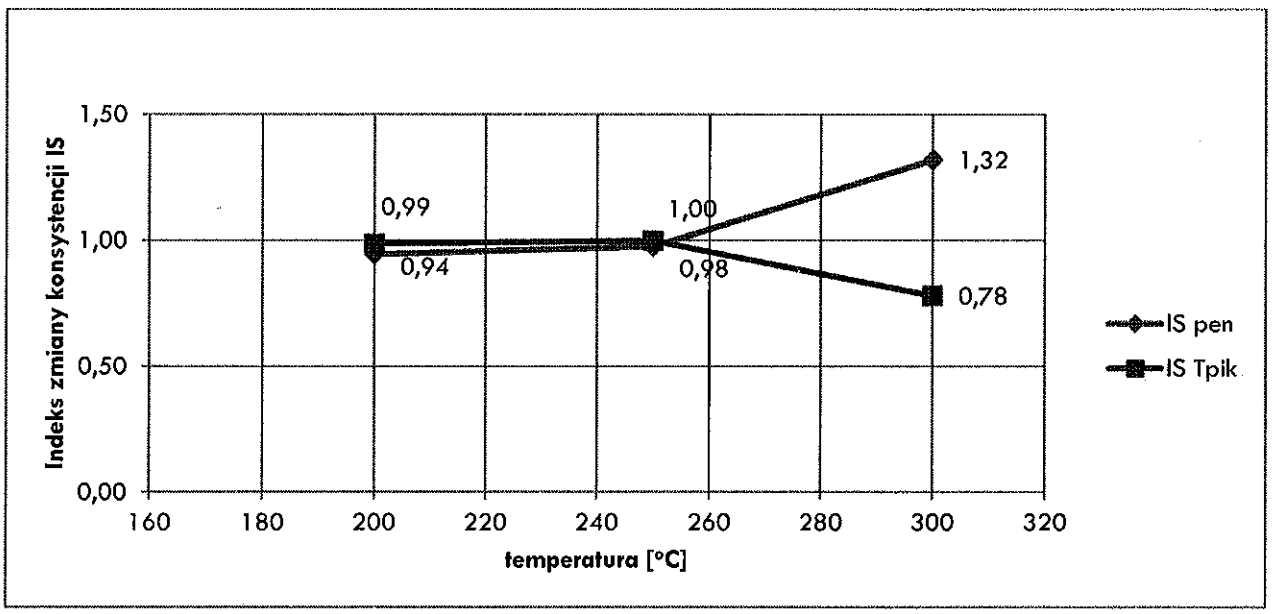


Rys. 4-7. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu 20/30 w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

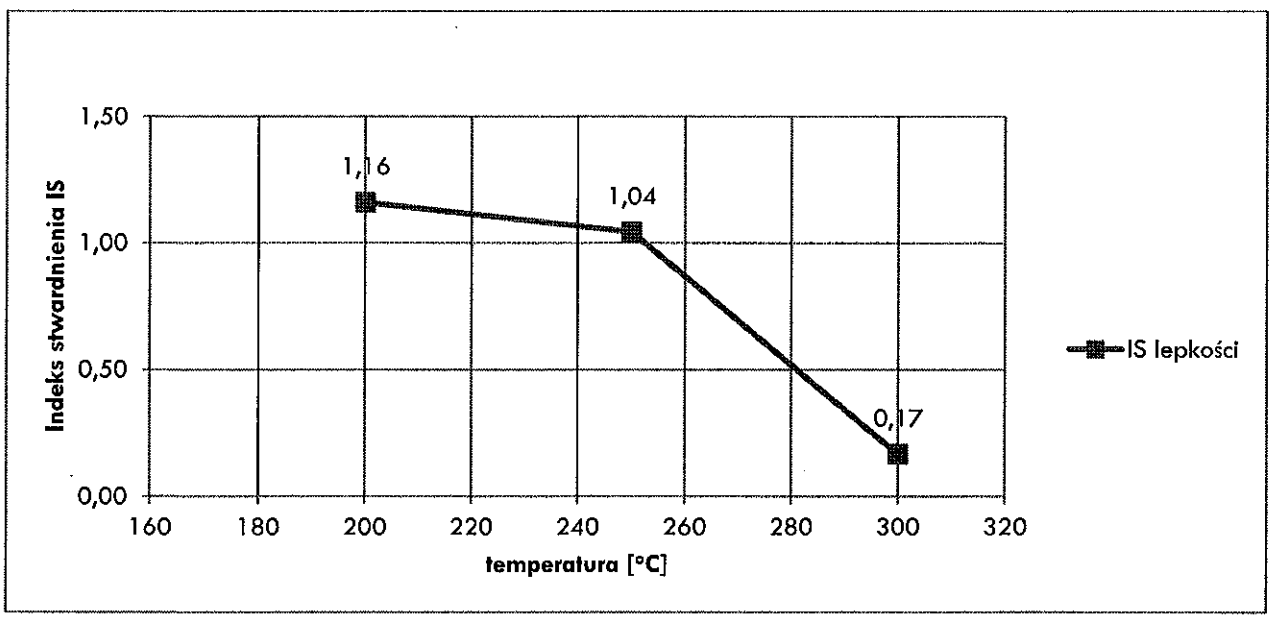
Tablica 4-8. Wyniki badań asfaltu PmB 65/105-60 do izolacji i nawierzchni mostowych

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 mięknienia 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 lepiszcza

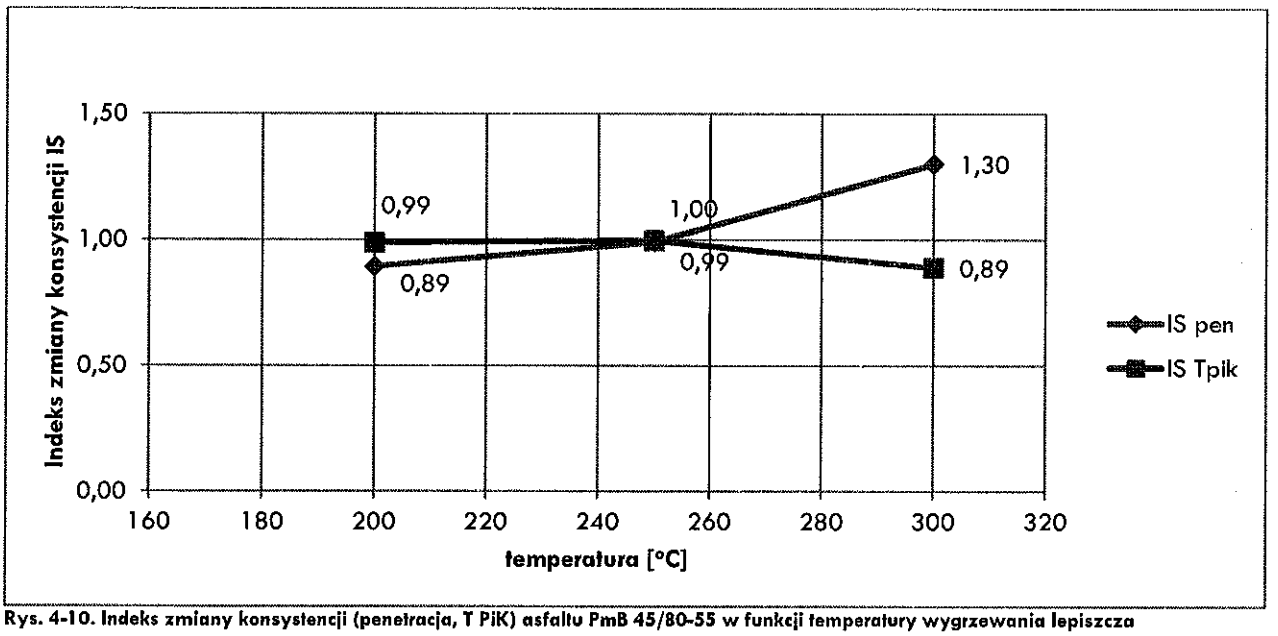


Rys. 4-9. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu PmB 65/105-60 w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

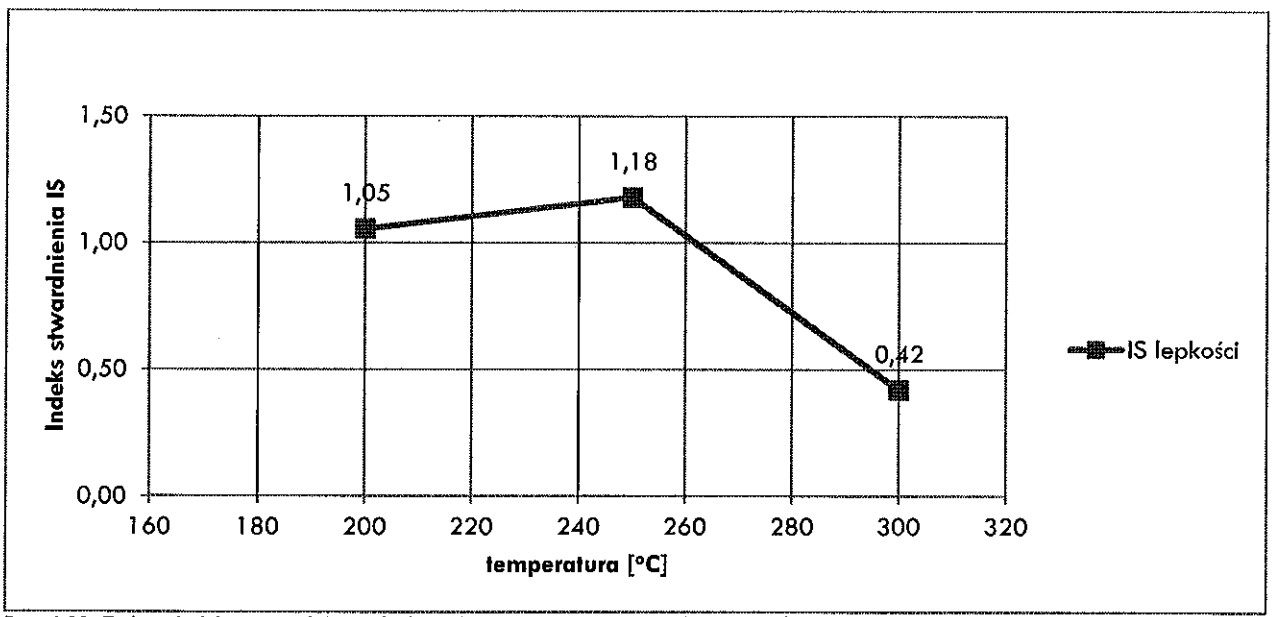
Tablica 4-9. Wyniki badań asfaltu PmB 45/80-55 do izolacji i nawierzchni mostowych

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 mięknienia 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

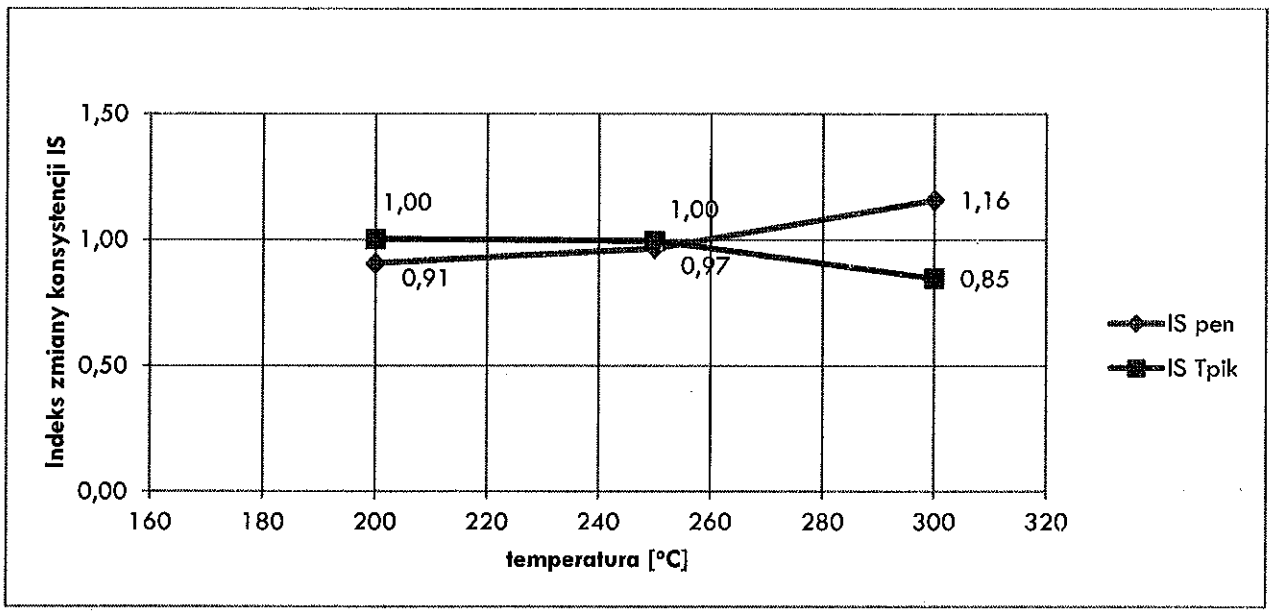


Rys. 4-11. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu PmB 45/80-55 w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

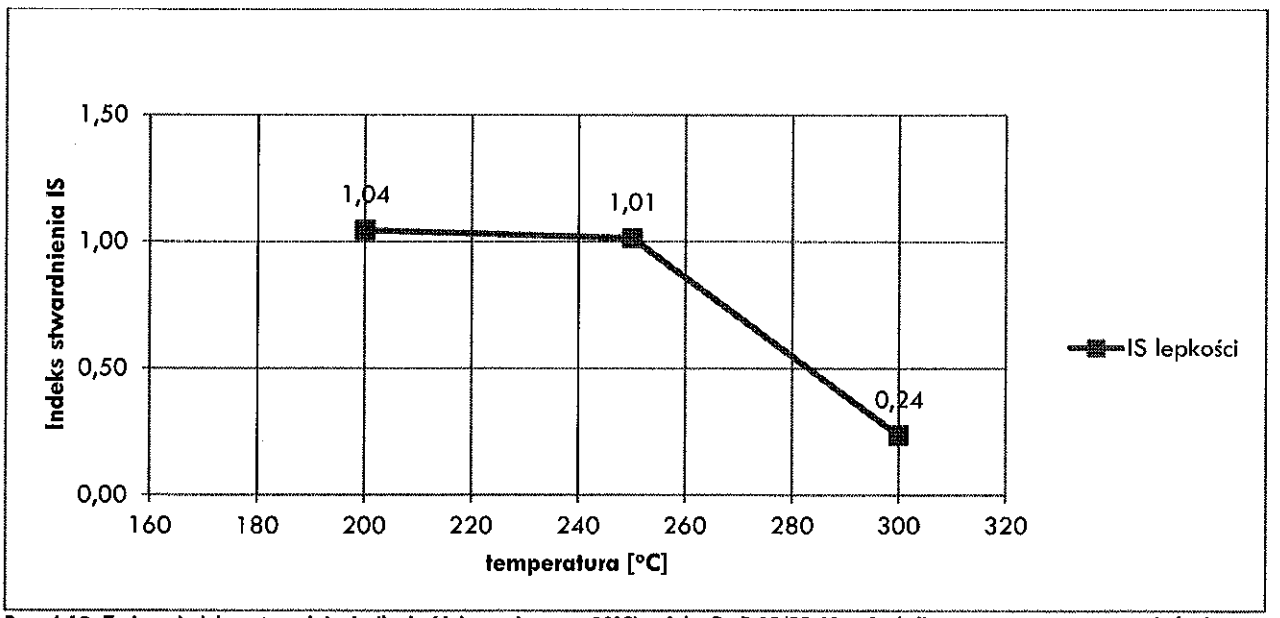
Tablica 4-10. Wyniki badań asfaltu PmB 25/55-60 do izolacji i nawierzchni mostowych

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 mięknienia 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 lepiszcza

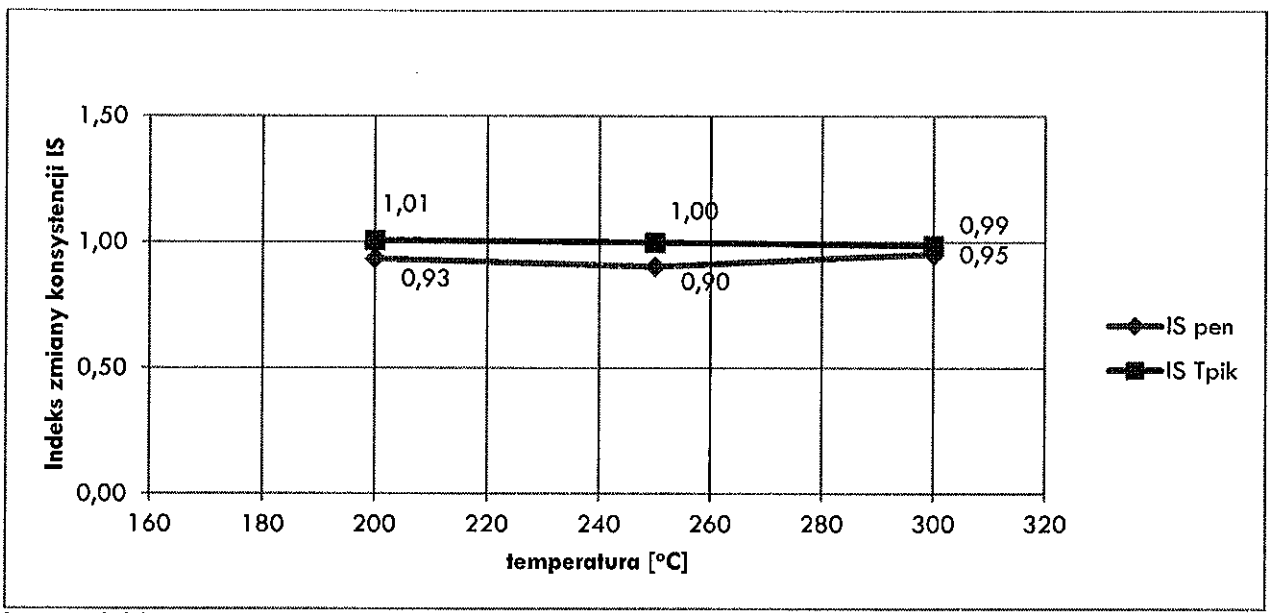


Rys. 4-13. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu PmB 25/55-60 w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

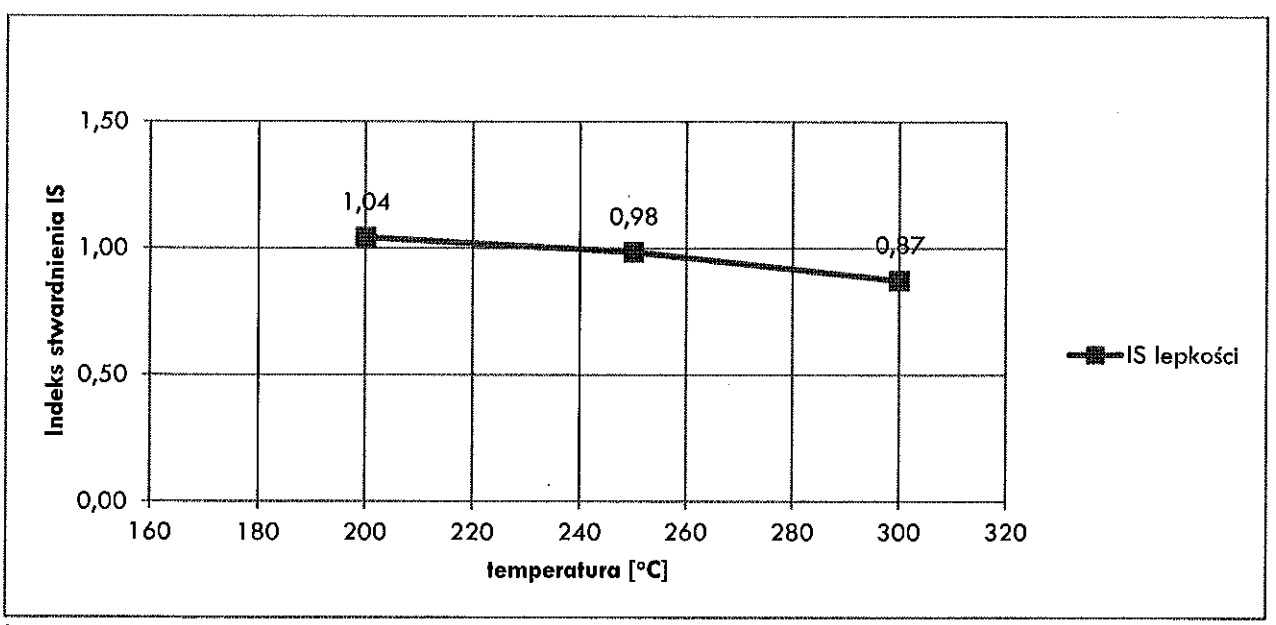
Tablica 4-11. Wyniki badań asfaltu 50/70+1,0% asf. nat. do izolacji i nawierzchni mostowych

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 mięknienia 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 lepiszcza

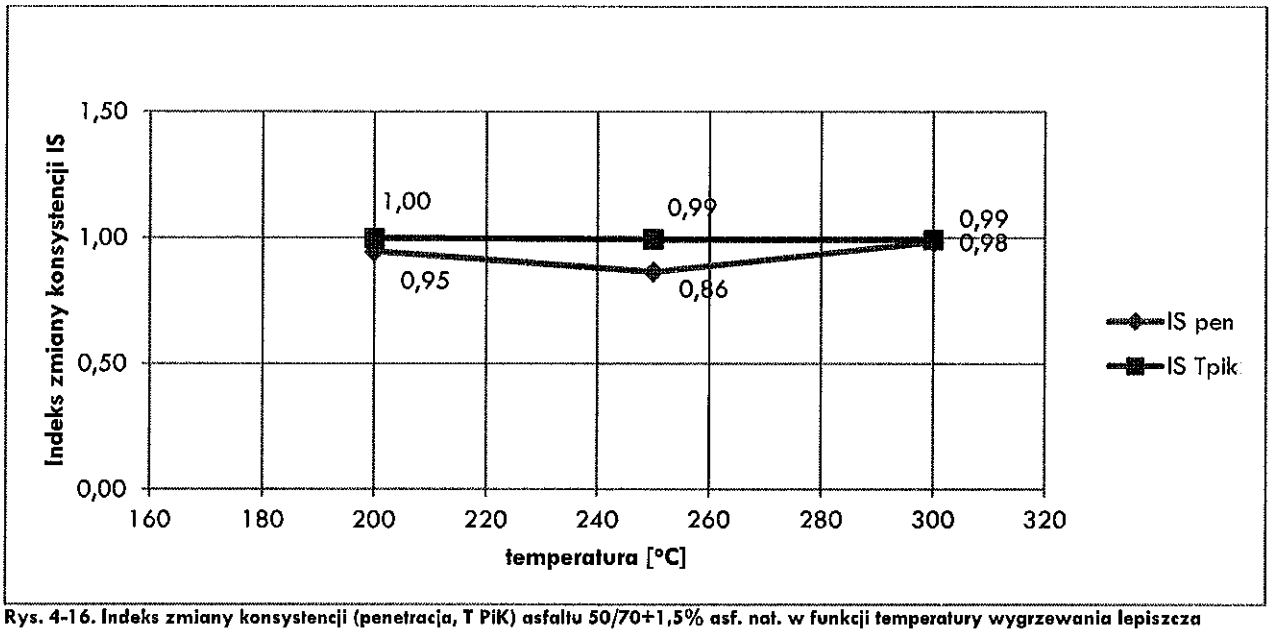


Rys. 4-15. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu 50/70+1,0% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

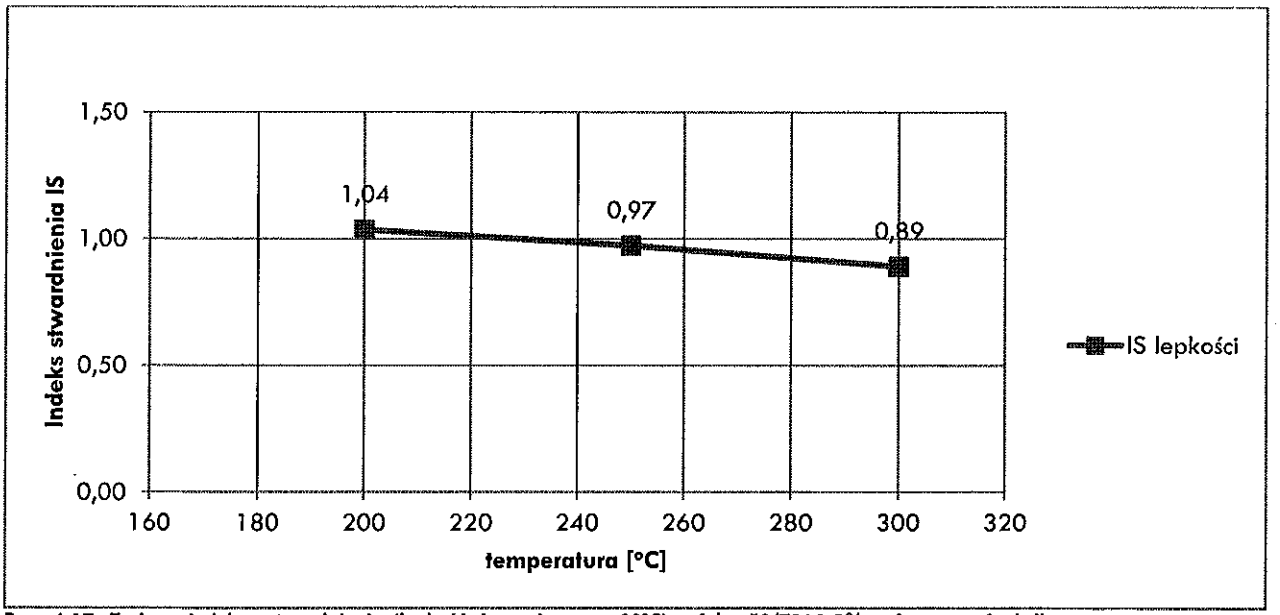
Tablica 4-12. Wyniki badań asfaltu 50/70+1,5% asf. nat. do izolacji i nawierzchni mostowych

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 mięknienia 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 lepiszcza

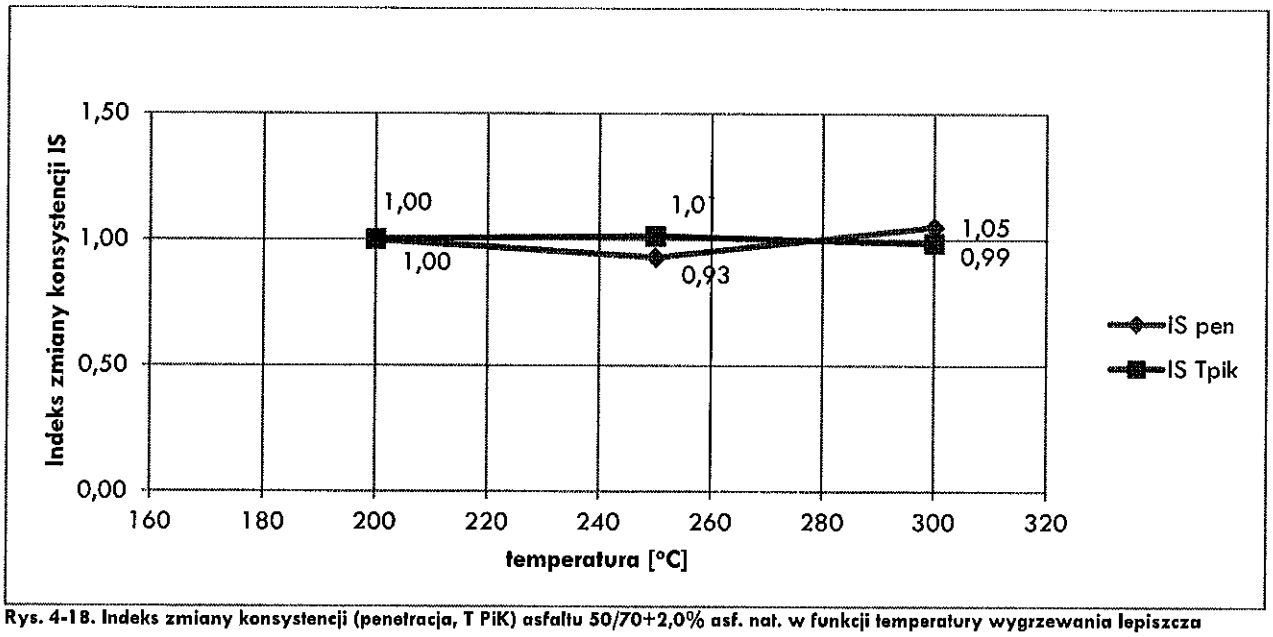


Rys. 4-17. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu 50/70+1,5% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

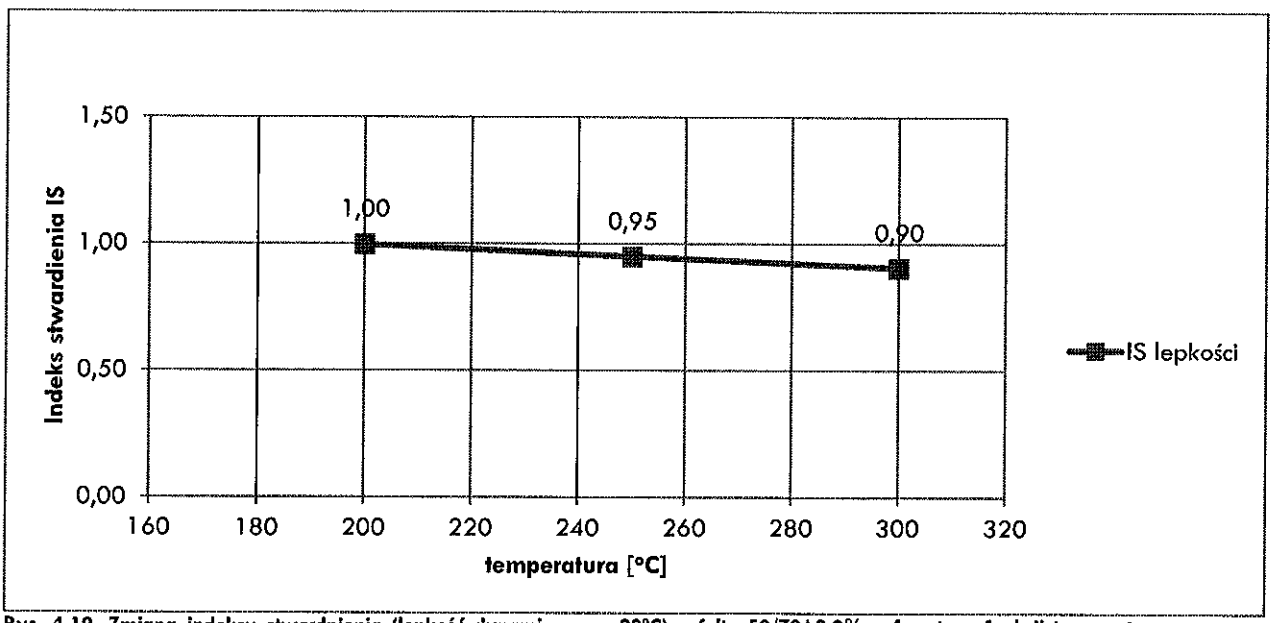
Tablica 4-13. Wyniki badań asfaltu 50/70+2,0% asf. nat. do izolacji i nawierzchni mostowych

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 mięknienia 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 lepiszcza

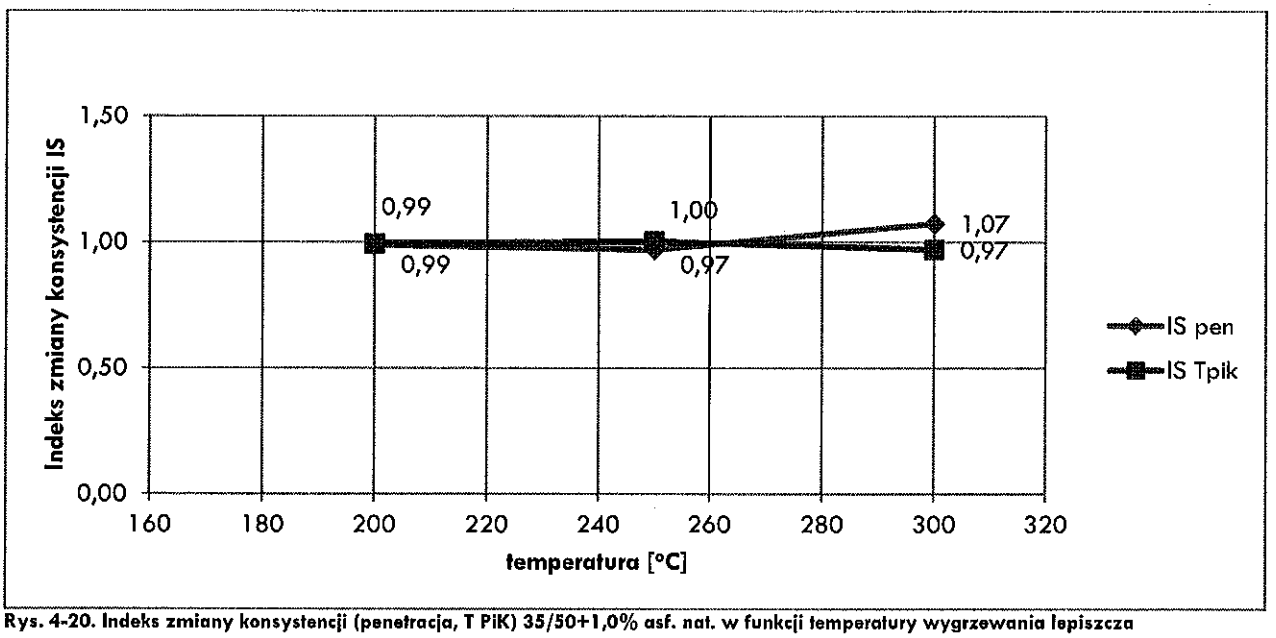


Rys. 4-19. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu 50/70+2,0% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

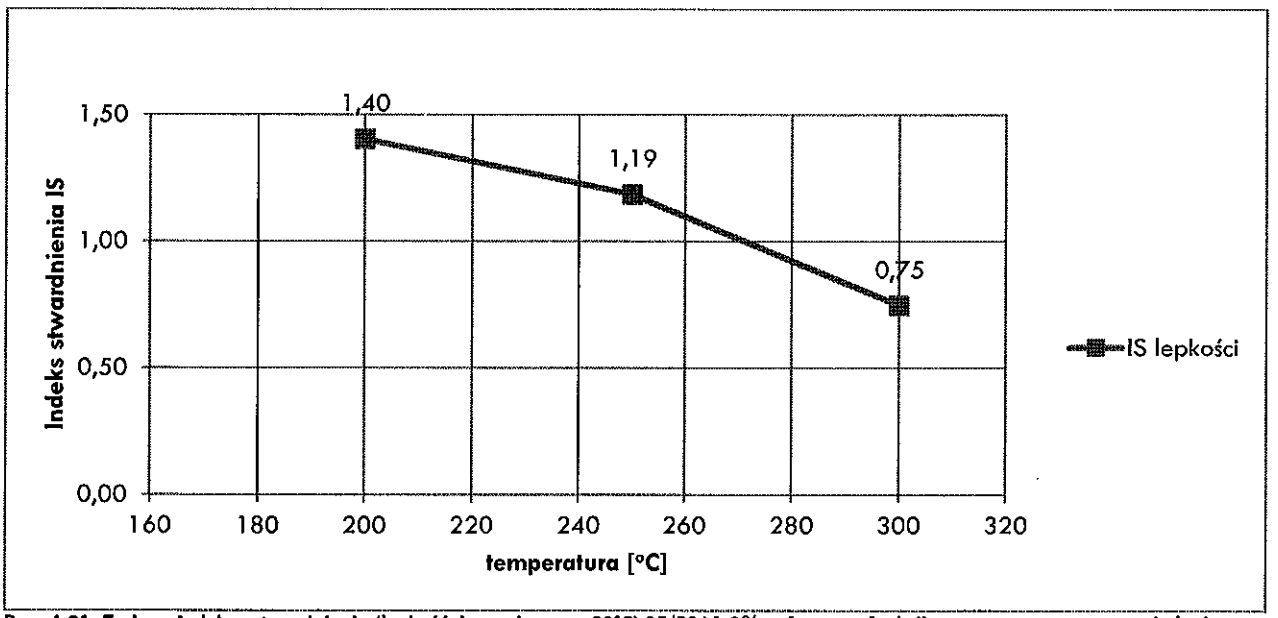
Tablica 4-14. Wyniki badań asfaltu 35/50+1,0% asf. nat. do izolacji i nawierzchni mostowych

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 mięknienia 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 lepiszcza

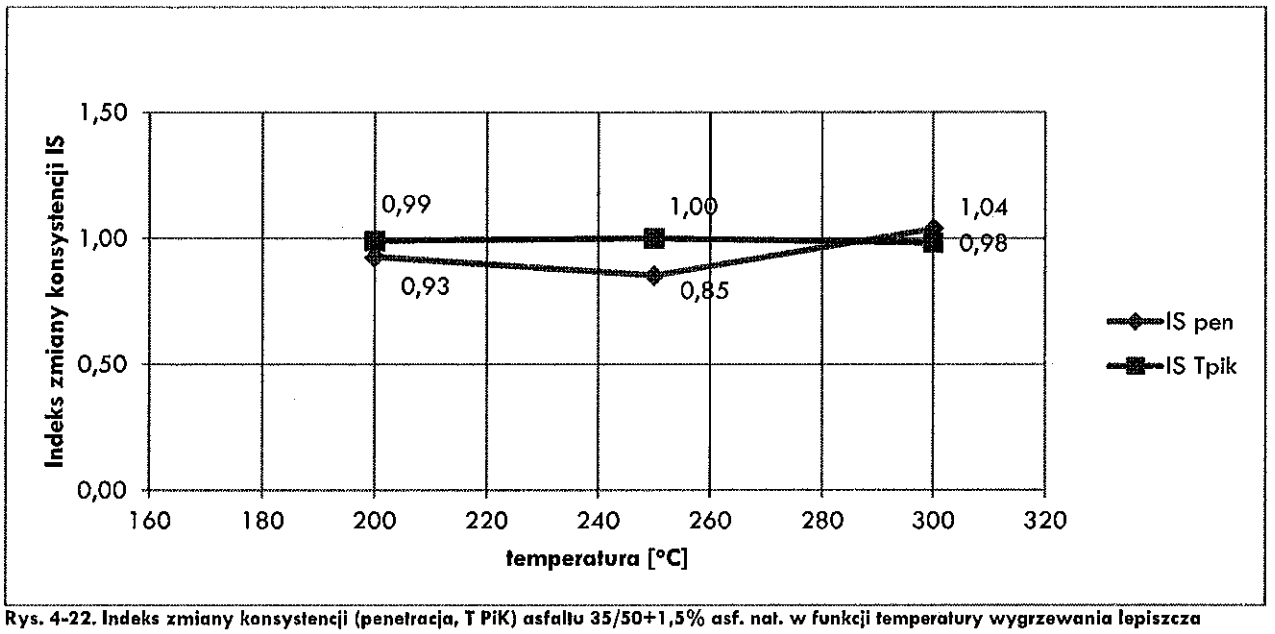


Rys. 4-21. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) 35/50+1,0% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

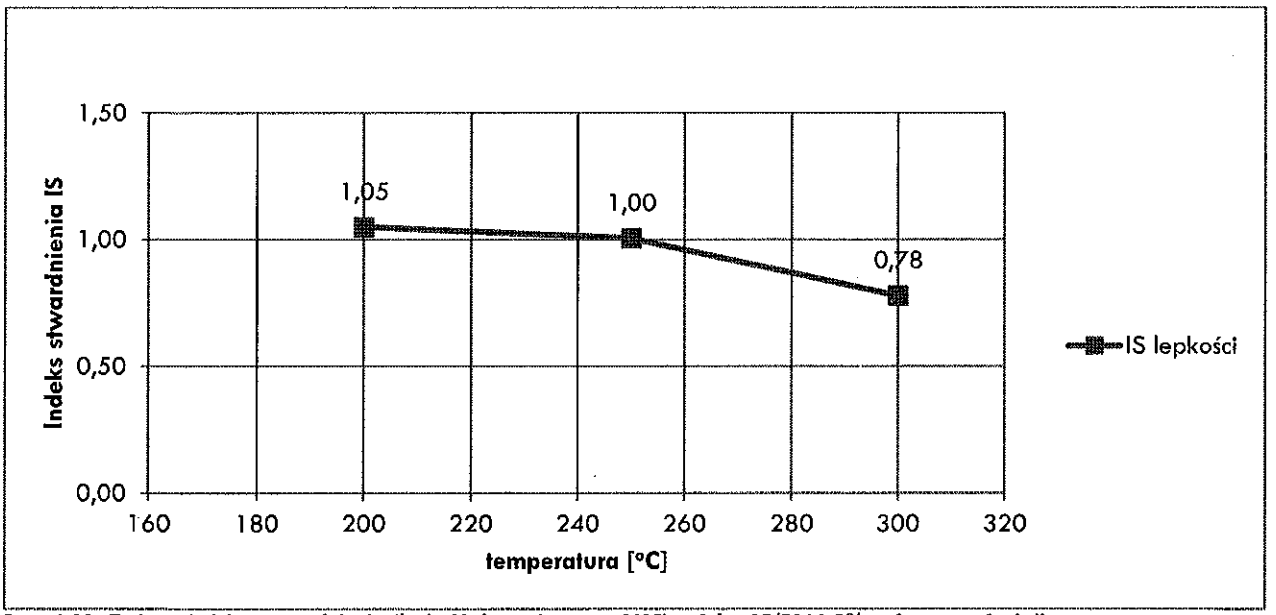
Tablica 4-15. Wyniki badań asfaltu 35/50+1,5% asf. nat. do izolacji i nawierzchni mostowych

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 mięknienia 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 lepiszcza

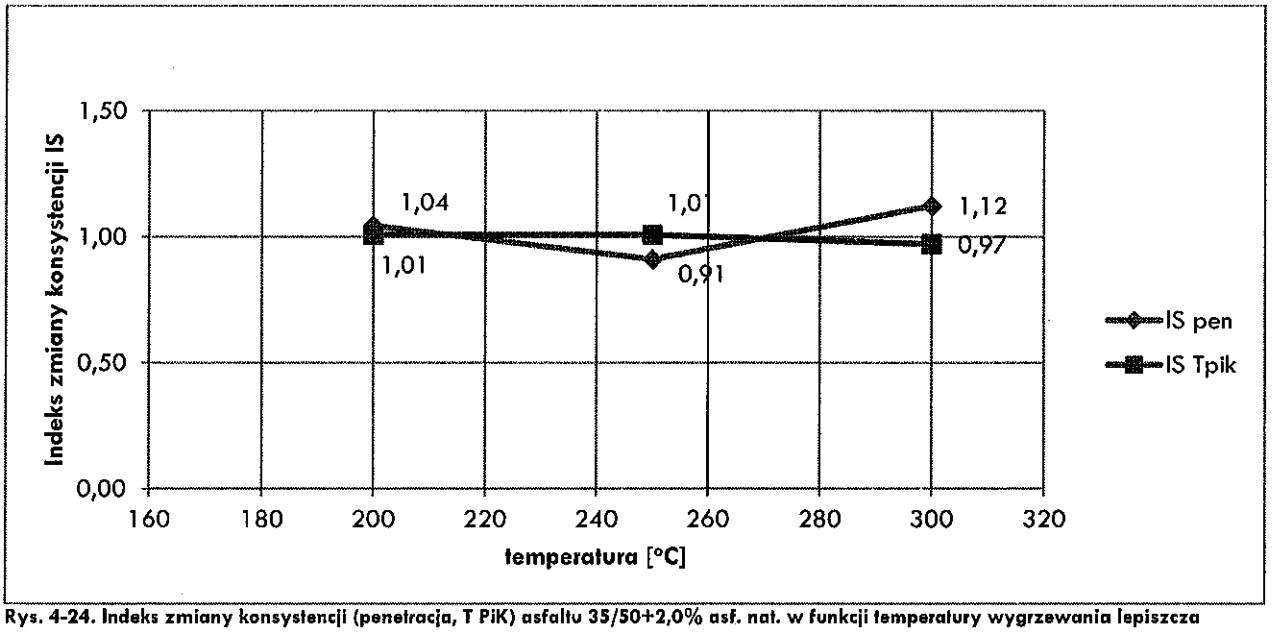


Rys. 4-23. Zmiana indeksu stwardnienia (lepkość dynamiczna w 90°C) asfaltu 35/50+1,5% asf. nat. w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

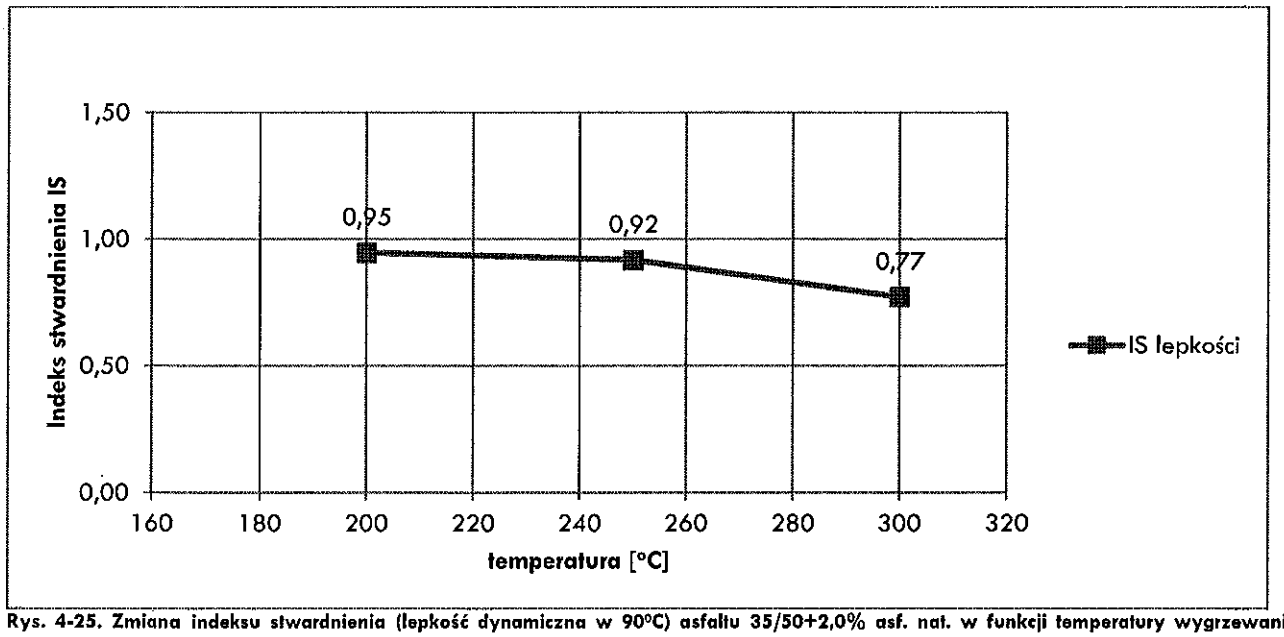
Tablica 4-16. Wyniki badań asfaltu 35/50+2,0% asf. nat. do izolacji i nawierzchni mostowych

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 mięknienia 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 lepiszczy asfaltowych i lepkości zestawionych w Tablicach 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 konsystencjiw 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

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 tablicy 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, załamań 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
Długość arkusza	cm	500; 750; 1000 (± 1%)	PN-B-04615
Szerokość arkusza	cm	100 (± 1%) i 100 (± 2%)*	PN-B-04615
Grubość arkusza	mm	≥ 5,0	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/1
Grubość warstwy izolacyjnej pod osnową	mm	≥ 3,0	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/2
Giętkość, badana na wałku Ø 30 mm	°C	≤ -20	PN-B-04615
Przesiąkliwość wg IBDiM	MPa	≥ 0,5 i ≥ 0,8*	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/3
Siła zrywająca przy rozciąganiu[1]:			PN-EN 12311-1
- wzdłuż arkusza	N	≥ 1000 i ≥ 1100*	
- w poprzek arkusza	N	≥ 800 i ≥ 850*	
Wydłużenie przy zerwaniu[1]:			PN-EN 12311-1
- wzdłuż arkusza	%	≥ 50	
- w poprzek arkusza	%	≥ 50 i ≥ 55*	
Siła zrywająca przy rozdzieraniu[1]:			Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/4
- wzdłuż arkusza	N	≥ 270 i ≥ 300*	
- w poprzek arkusza	N	≥ 250	
Siła zrywająca styki arkuszy papy	N	≥ 500 i ≥ 700	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/9
Przyczepność do podłoża metodą „pull off"	MPa	≥ 0,5	Procedura badawcza IBDiM Nr PB-TM-1/5
Odporność na działanie podwyższonej temperatury przez 2h	°C	≥ 100	PN-B-04615

* różnice w wymaganiach odnośnie analizowanych pap mostowych

[1] Oznaczenie papy wykonać w temperaturze (20 ± 2) °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 tablicy 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.

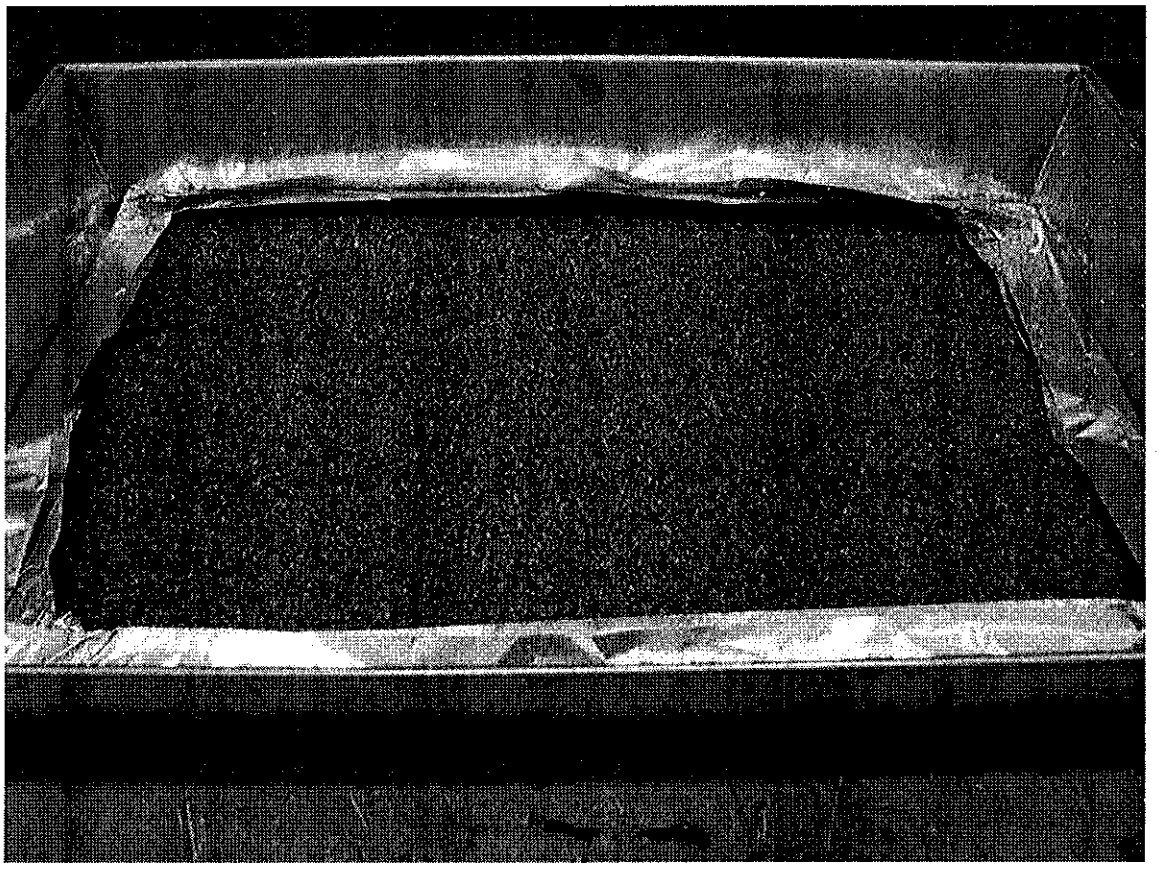
Pomost obiektu mostowego wraz z nawierzchnią narażony jest, w ciągu całego roku, na szybkie schładzanie w okresie zimowym i nagrzewanie w okresie lata. Przyjmuje się, że w okresie zimowym minimalna temperatura może wynosić - 30°C a w okresie letnim nawierzchnia może nagrzewać się do temperatury 70°C.

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.

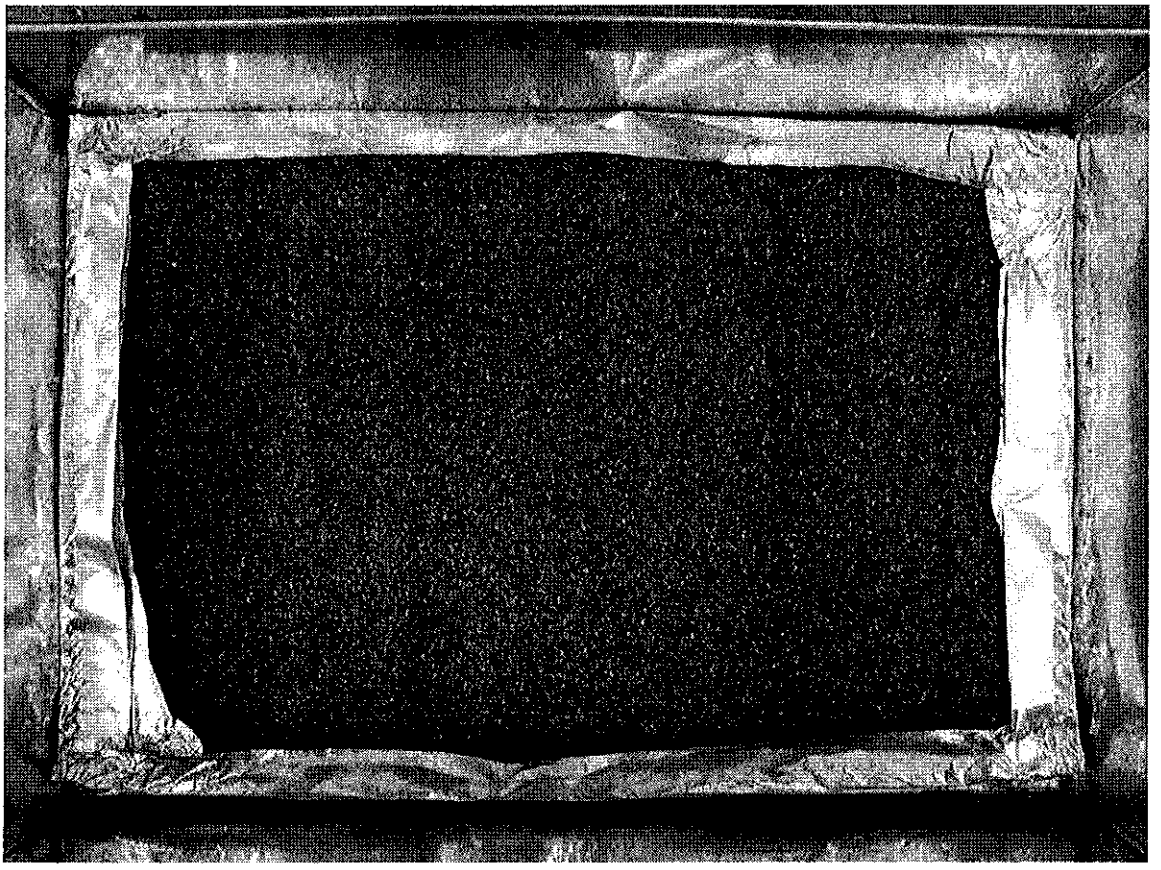
Po procesie wygrzewania badane próbki pap mostowych poddano badaniu giętkości w temperaturze -30°C wg PN-EN 1109:2010 pkt 9.1.

4.2.4 Wyniki badań pap zgrzewalnych

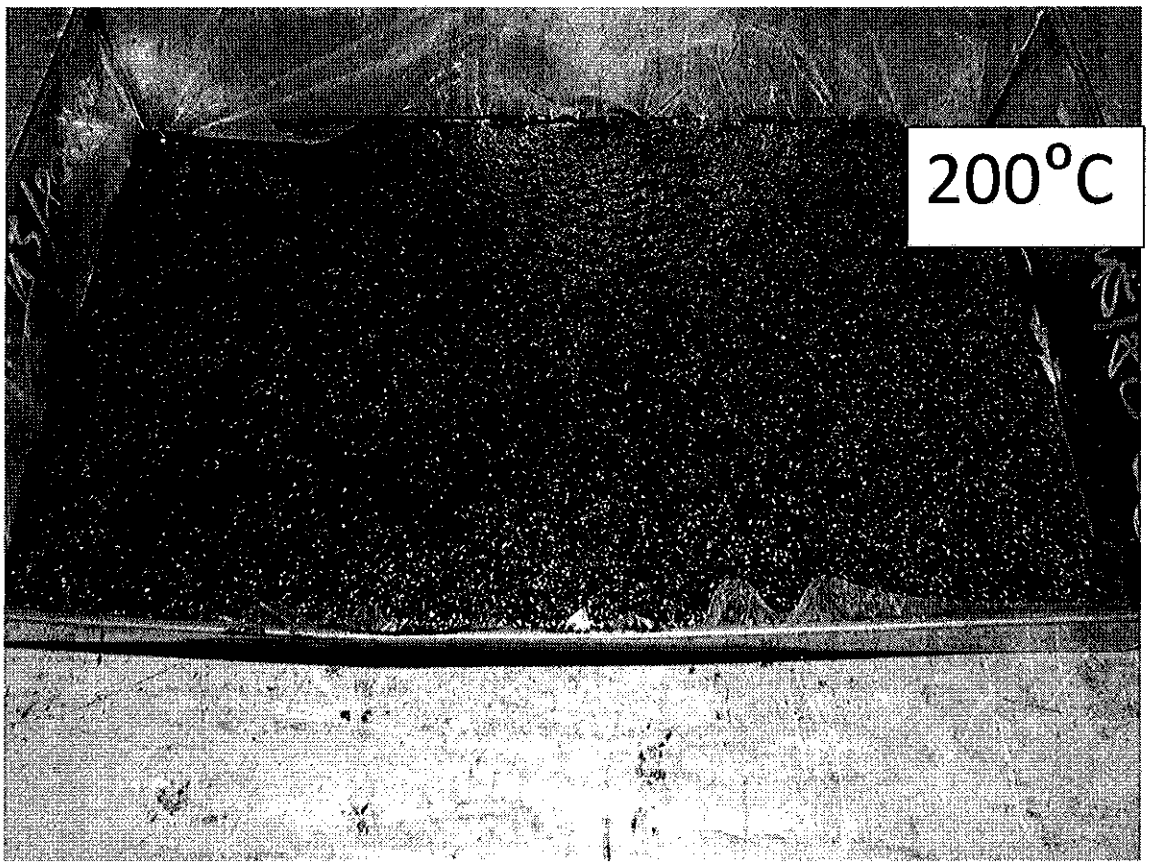
Wyniki badań właściwości pap mostowych nr 1 i 2 nie wygrzewanych (oryginalnych) oraz wygrzewanych w temperaturze 200, 250 i 300°C przedstawiono w tablicach 4-19 i 4-20. Zmiany powierzchni próbek po procesie wygrzewania pokazano na Rys. 4-26 do 4-33. W wyniku oddziaływania wysokiej temperatury papy uległy 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.



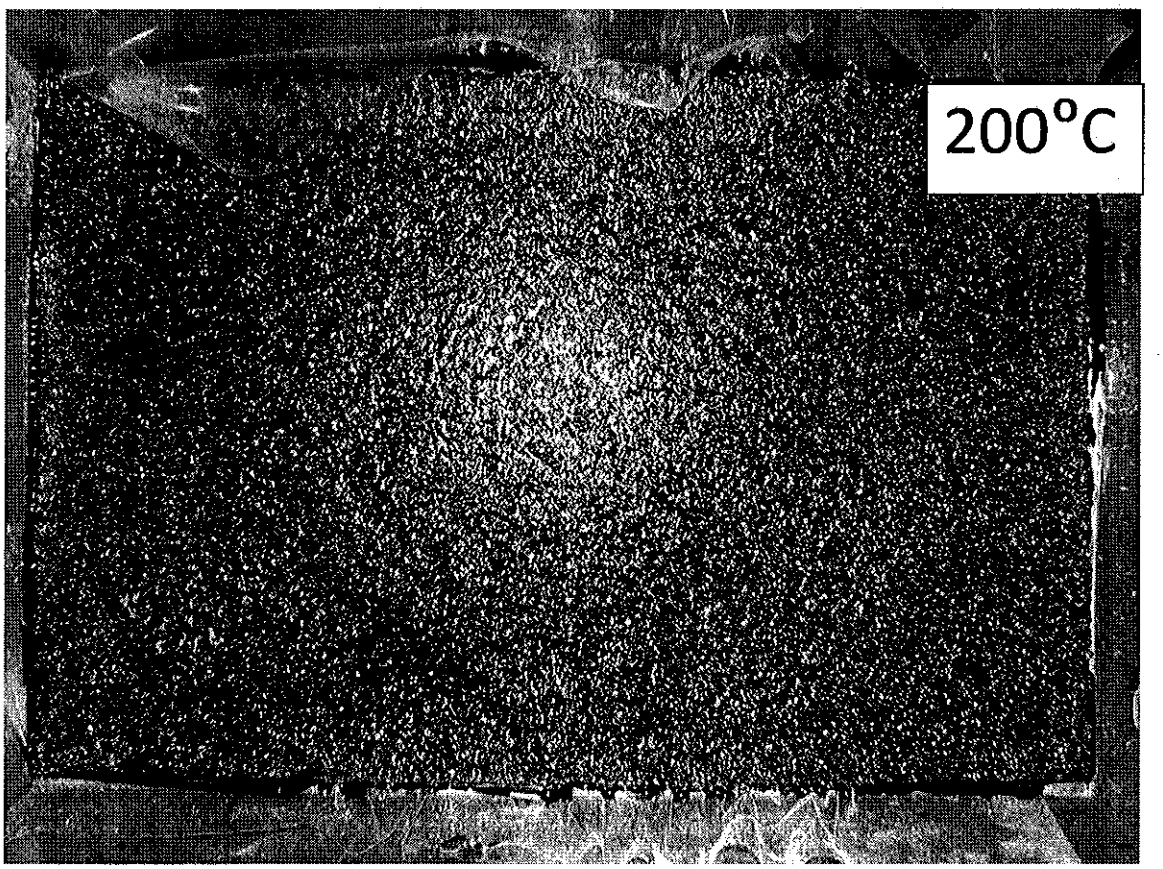
Rys. 4-26. Papa mostowa przed wygrzewaniem



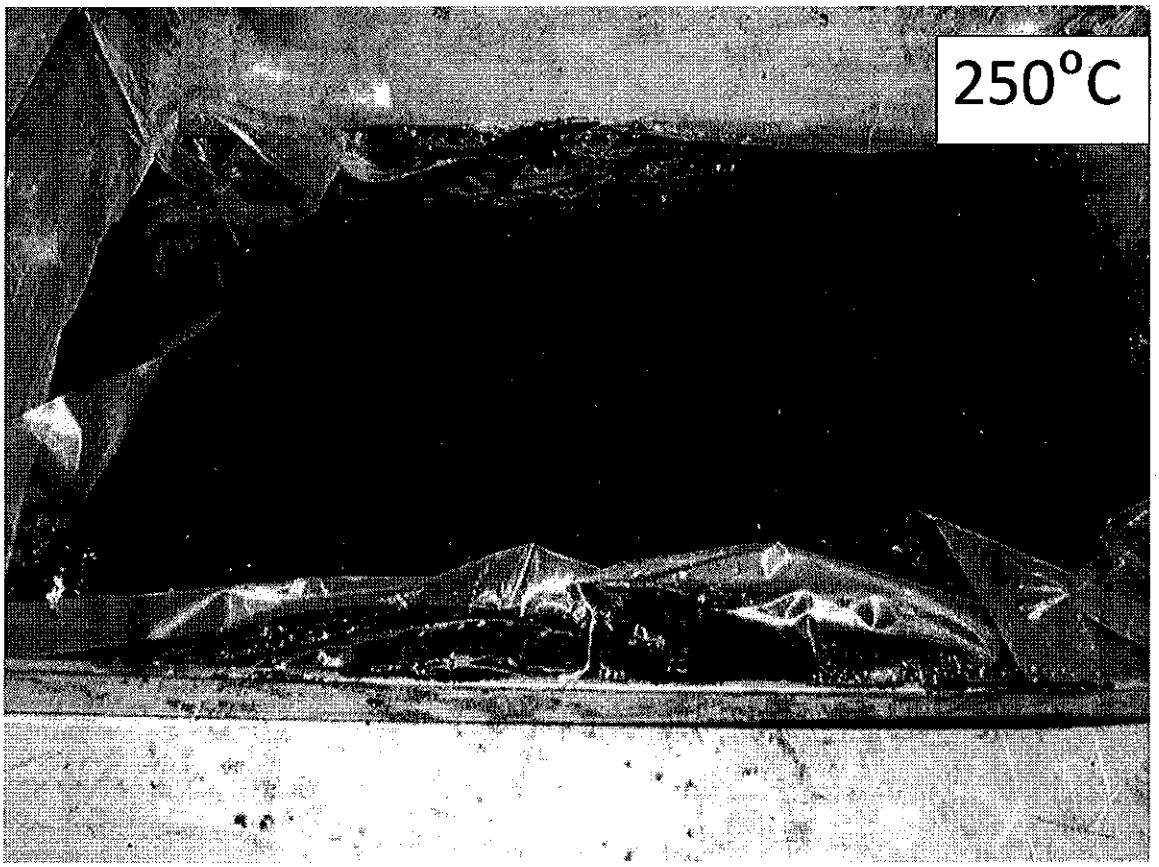
Rys. 4-27. Papa mostowa przed wygrzewaniem



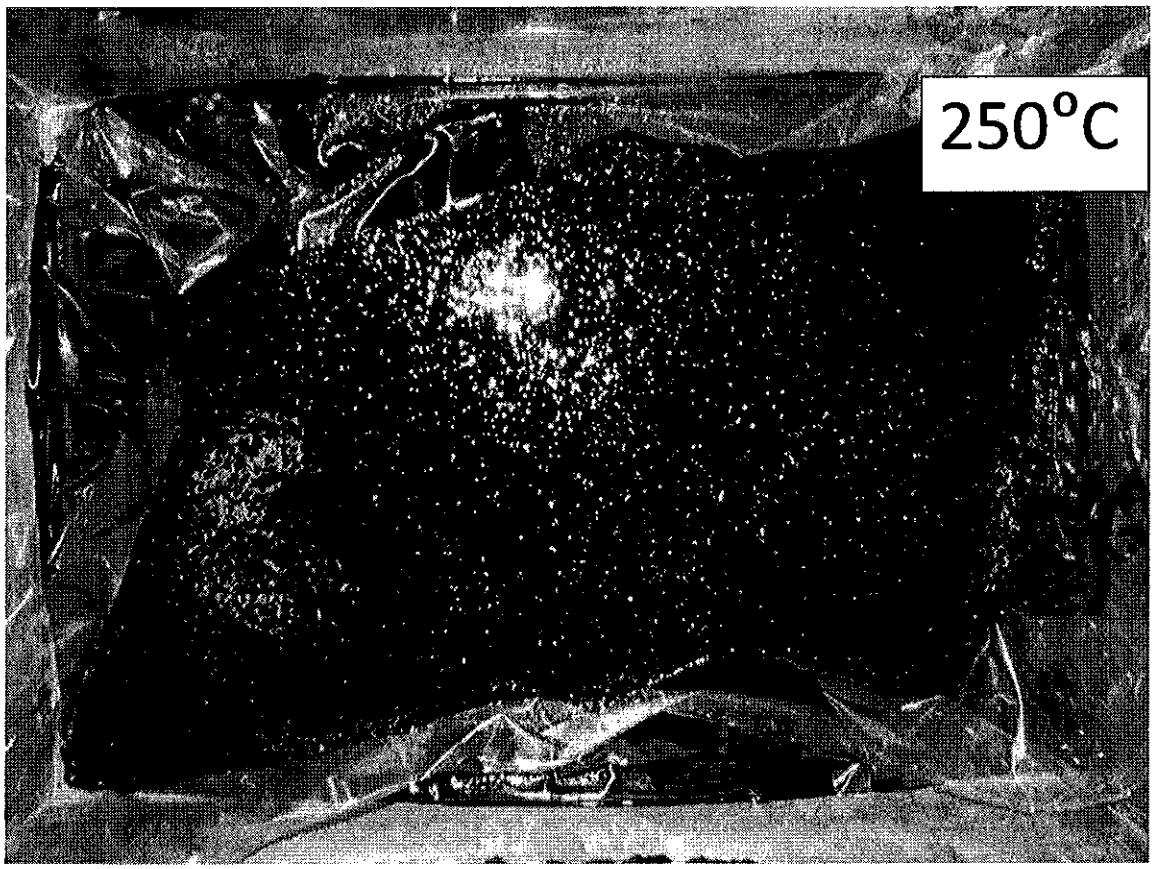
Rys. 4-28. Papa mostowa wygrzewana przez 1 godzinę w temperaturze 200°C



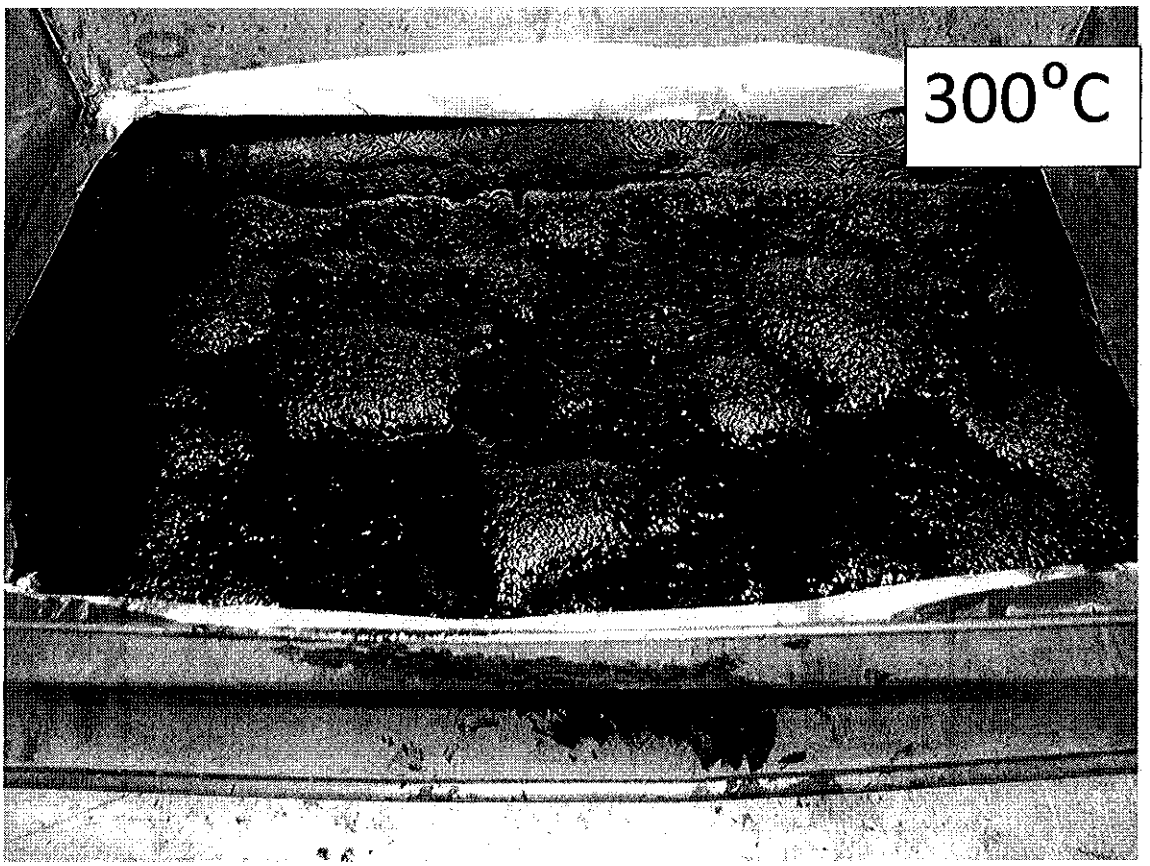
Rys. 4-29. Papa mostowa wygrzewana przez 1 godzinę w temperaturze 200°C



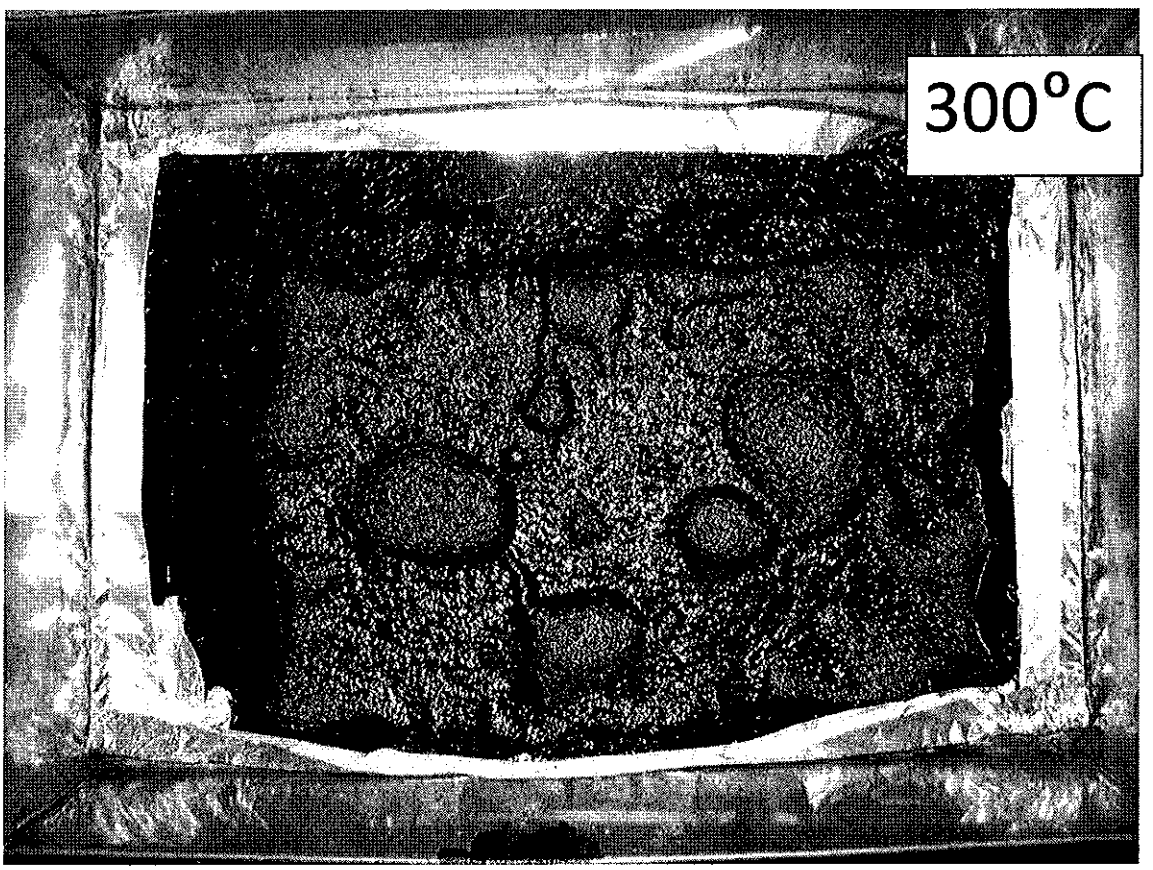
Rys. 4-30. Papa mostowa wygrzewana przez 1 godzinę w temperaturze 250°C



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

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

4.3.1 Materiały

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

- mączka wapienna,
- piasek łamany z otoczaków 0,063/2 mm,
- asfalt drogowy 35/50.

4.3.2 Badania materiałów kamiennych – uziarnienie

W celu ustalenia optymalnego składu mieszanki mineralnej wykonano oznaczenie składu ziarnowego materiałów kamiennych. Wyniki oznaczenia składu ziarnowego wypełniacza i piasku przedstawiono w Tablicy 4-21.

Tablica 4-21. Uziarnienie materiałów kamiennych

Wymiar boku kwadratowego oczka sita [mm]	Zawartość ziaren pozostających na sicie [%]	
	Mączka wapienna	Piasek łamany z otoczaków 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

4.3.3 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." i PN-EN 1097-7 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna".

Wyniki oznaczenia przedstawiono w Tablicy 4-22.

Tablica 4-22. Gęstości piasku i wypełniacza

Rodzaj kruszywa	Gęstość, g/cm³
Piasek łamany z otoczaków	2,703
Mączka wapienna	2,710

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

Mieszankę mineralno-asfaltową typu mastyksowego (mastyks izolacyjny) zaprojektowano zgodnie z wymaganiami Katalogu Zabezpieczeń Powierzchniowych Drogowych Obiektów Inżynierskich IBDiM.

Skład mieszanki mineralno-asfaltowej przedstawiono w Tablicy 4-23.

Tablica 4-23. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej typu mastyksowego

Materiały	Skład mieszanki mineralnej	Skład mastyksu izolacyjnego
Asfalt drogowy: 35/50	0,0%	13,0%
Mączka wapienna	40,2%	35,0%
Piasek łamany z otoczaków 0,063/2	59,8%	52,0%
Σ	100,0%	100,0%

4.3.5 Program badań mastyksu izolacyjnego

Mieszanki mineralno-asfaltowe do izolacji mostowych, podczas produkcji, transportu i układania mogą być narażone na oddziaływanie wysokich temperatur, przewyższających temperatury wymagane procesami technologicznymi. Dodatkowo, izolacja z MMA 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, mastyks izolacyjny poddano wygrzewaniu w temperaturze: 200, 250 i 300°C. Czas wygrzewania wynosił 1 godzinę. Po procesie wygrzewania badane próbki mastyksu schłodzono a następnie wycięto, za pomocą koronki wiertniczej o średnicy 100 mm, próbki analityczne do badań (Rys. 4-34).

Rys. 4-34. Próbki analityczne mastyksu izolacyjnego po wygrzewaniu w temperaturze 200°C przygotowane do badań (widoczna dolna powierzchnia próbek)

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,
- pomiar modułu sztywności w rozciąganiu pośrednim, metoda IT-CY wg PN-EN 12697-26.

Badanie penetracji stemplem służy do oceny odporności warstwy wykonanej z mieszanki mineralno-asfaltowej na deformacje trwałe w temperaturze 40°C. Badania wykonano na próbkach walcowych, skrępowanych bocznie przez umieszczenie ich w cylindrycznych formach Marshalla i uszczelnienie zaczynem gipsowym.

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 [2]. Badania przeprowadzono w temperaturze 10°C, co odpowiada temperaturze w średnich warunkach użytkowych nawierzchni a badana próbka pozostaje w stanie lepkosprężystym.

4.3.6 Wyniki badań mastyksu izolacyjnego

Wyniki badań właściwości mastyksu do izolacji mostowych wygrzewanego (oryginalnego) oraz wygrzewanego w temperaturze 200, 250 i 300°C przedstawiono w tablicach 4-24 i 4-25.

Zmiany powierzchni próbek po procesie wygrzewania pokazano na Rys. 4-35 do 4-38.

Na Rys. 4-39 przedstawiono w formie graficznej indeksy zmiany twardości mastyksu określone na podstawie pomiarów penetracji stemplem a na Rys. 4-40 indeksy zmiany modułu sztywności w funkcji temperatury wygrzewania 200, 250 i 300°C.

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

$$IS\ pen.\ stemplem = \frac{PS30(200; 250; 300°C)}{PS30} \tag{9}$$

gdzie:

$PS30(200; 250; 300°C)$ – 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:

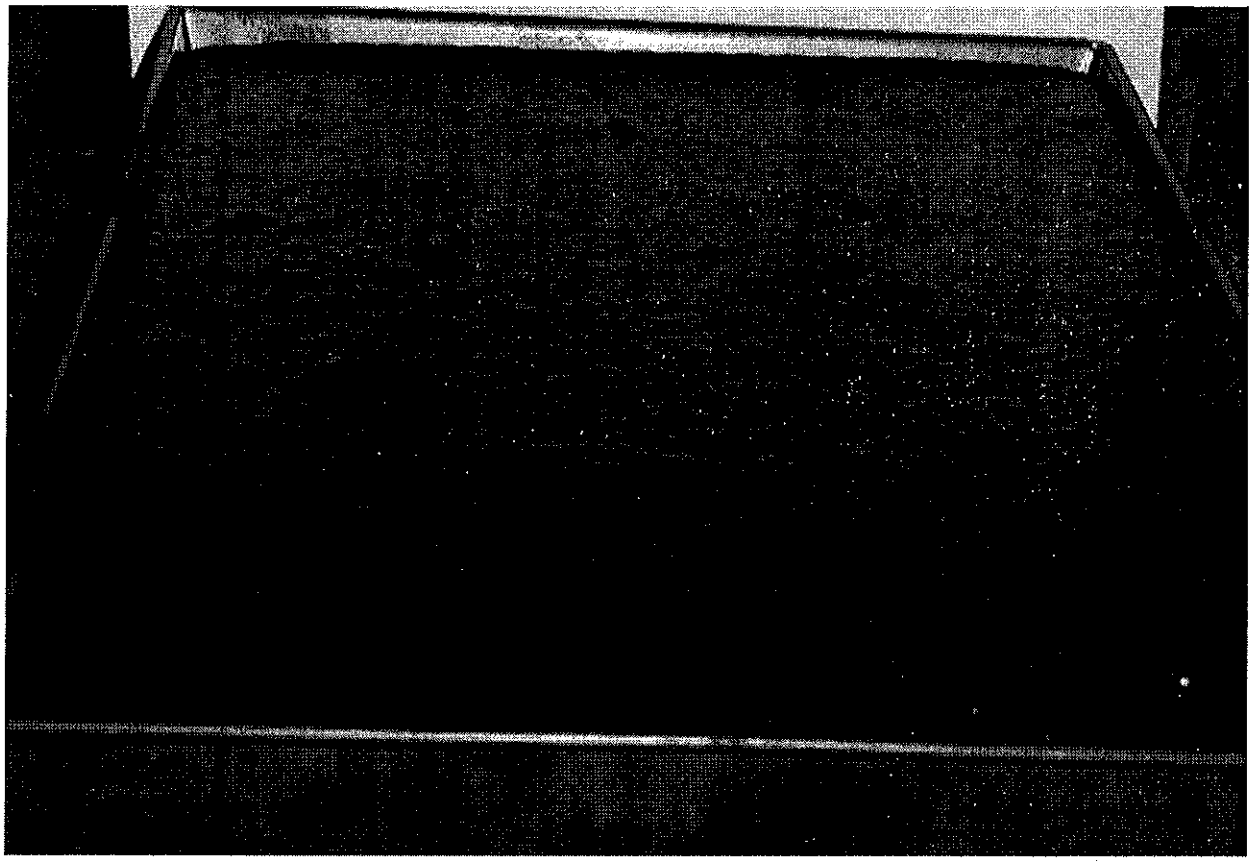
$$IS\ modułu\ szt. = \frac{MS10(200; 250; 300°C)}{MS10} \tag{10}$$

gdzie:

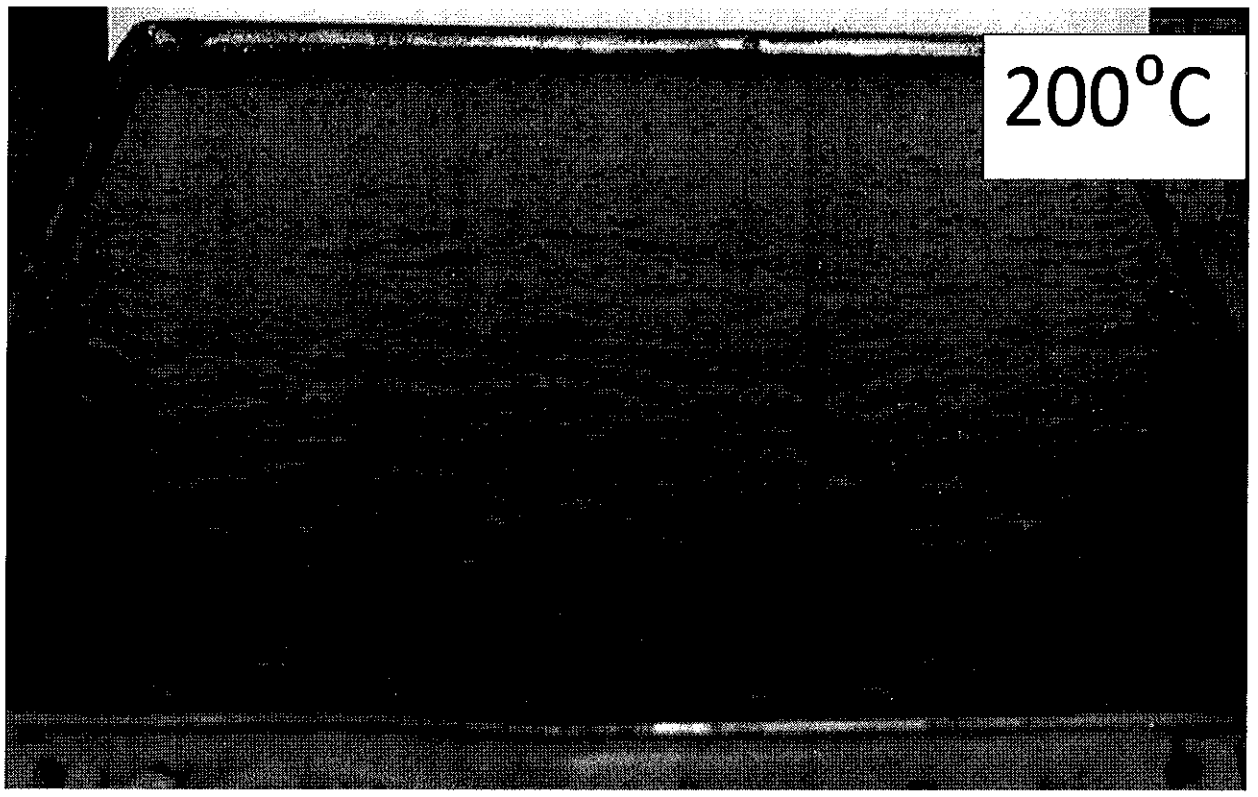
$MS10(200; 250; 300°C)$ – moduł sztywności po wygrzewaniu w temp. 200, 250, 300°C, określony w temp. 10°C, [MPa]

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

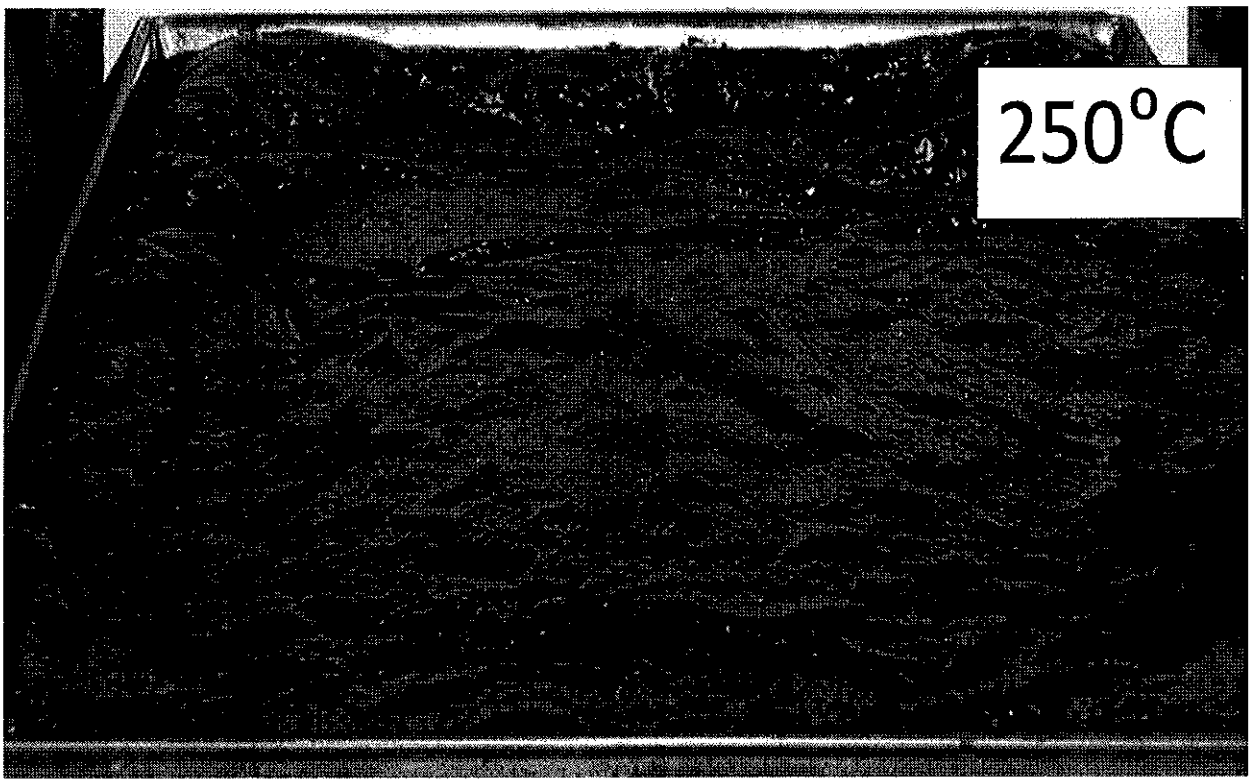
W wyniku oddziaływania wysokiej temperatury (250°C i wyżej) powierzchnia mastyksu uległa znacznemu zniekształceniu, wystąpiły liczne nierówności. Mieszanka mineralno-asfaltowa wykazała również skłonność do segregacji, szczególnie po wygrzewaniu w temperaturze 300°C, dlatego przed zaformowaniem została ujednorodniona. Mastyks tradycyjny, podobnie jak asfalt lany (MA), jest przewożony w kotłach wyposażonych w mieszadła. Proces ciągłego mieszania skutecznie eliminuje zjawisko segregacji mieszanki w wysokiej temperaturze.



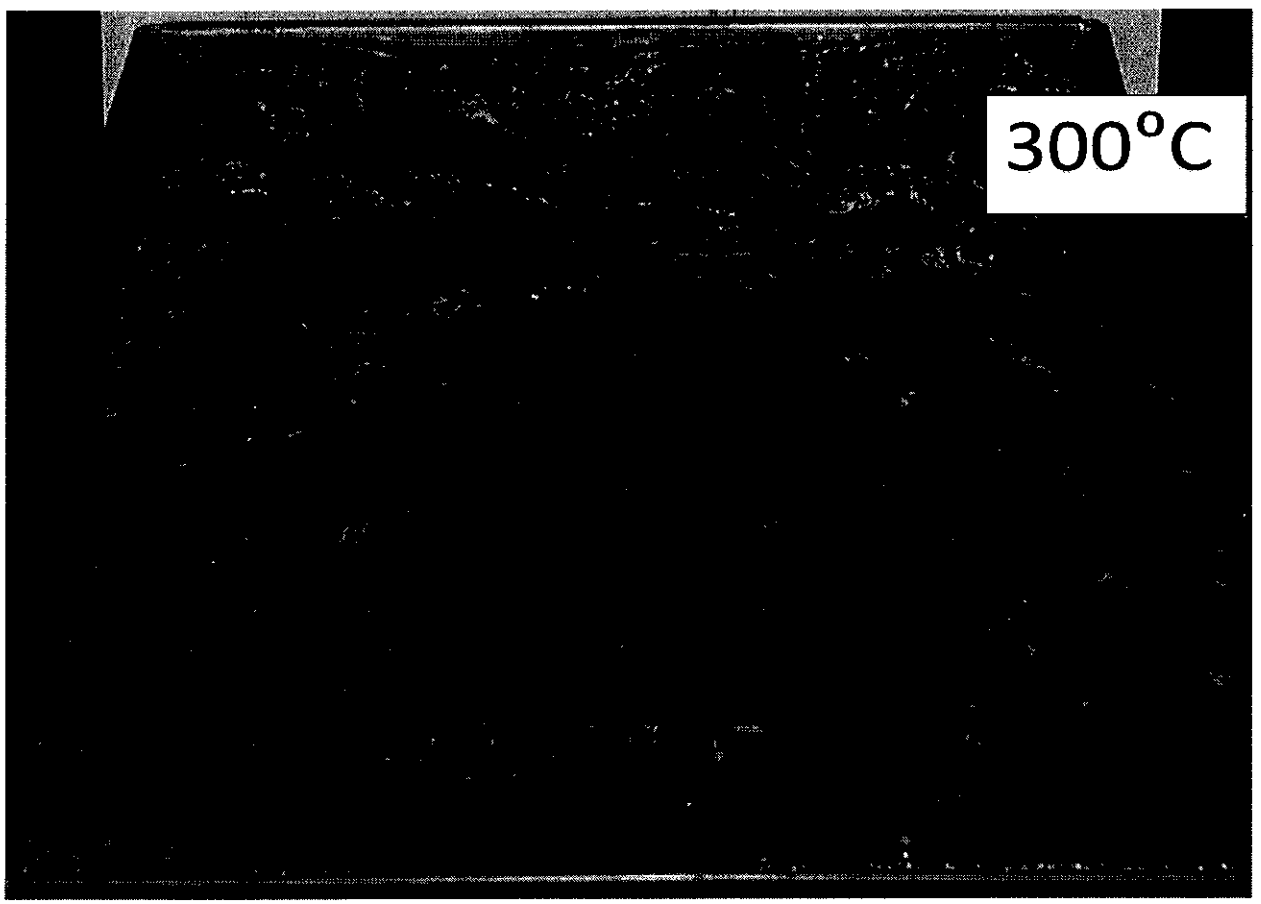
Rys. 4-35. Mastyks izolacyjny nie poddany wygrzewaniu



Rys. 4-36. Mastyks izolacyjny wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 200°C



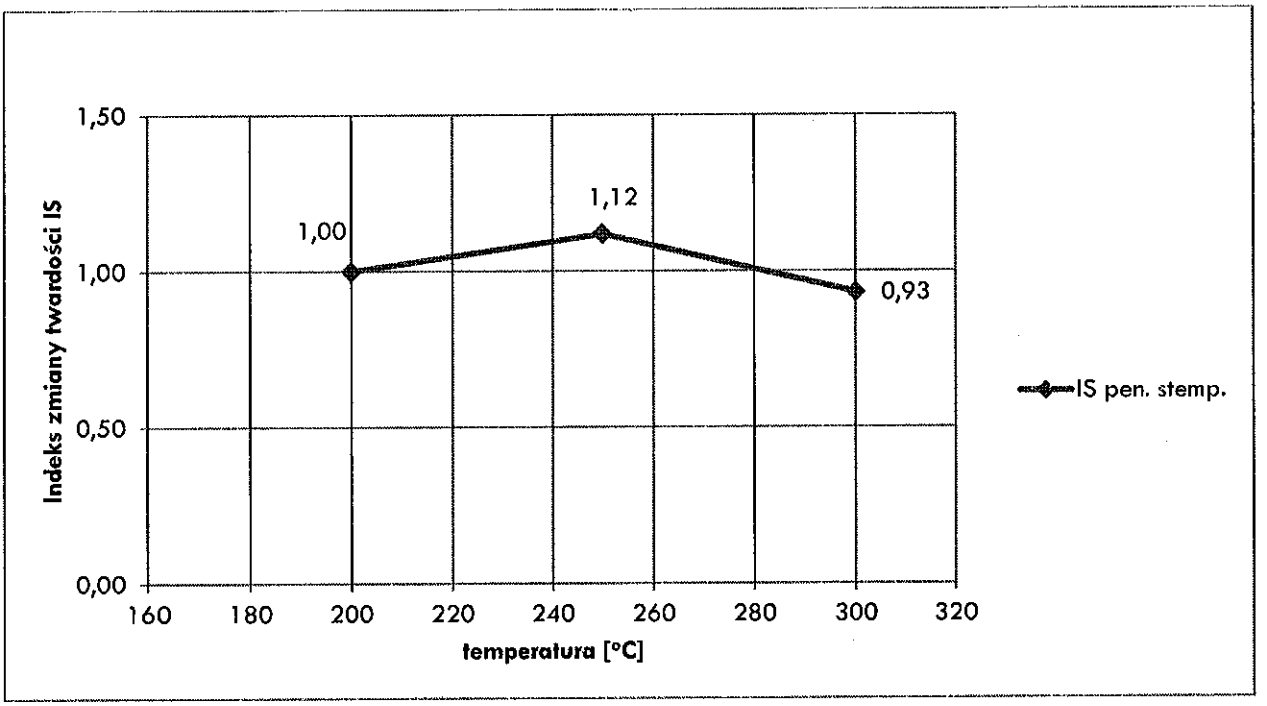
Rys. 4-37. Mastyks izolacyjny wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 250°C



Rys. 4-38. Mastyks izolacyjny wygrzewany przez 1 godzinę w temperaturze 300°C

Tablica 4-24. Wyniki badań penetracji stemplem mastyksu do izolacji mostowych

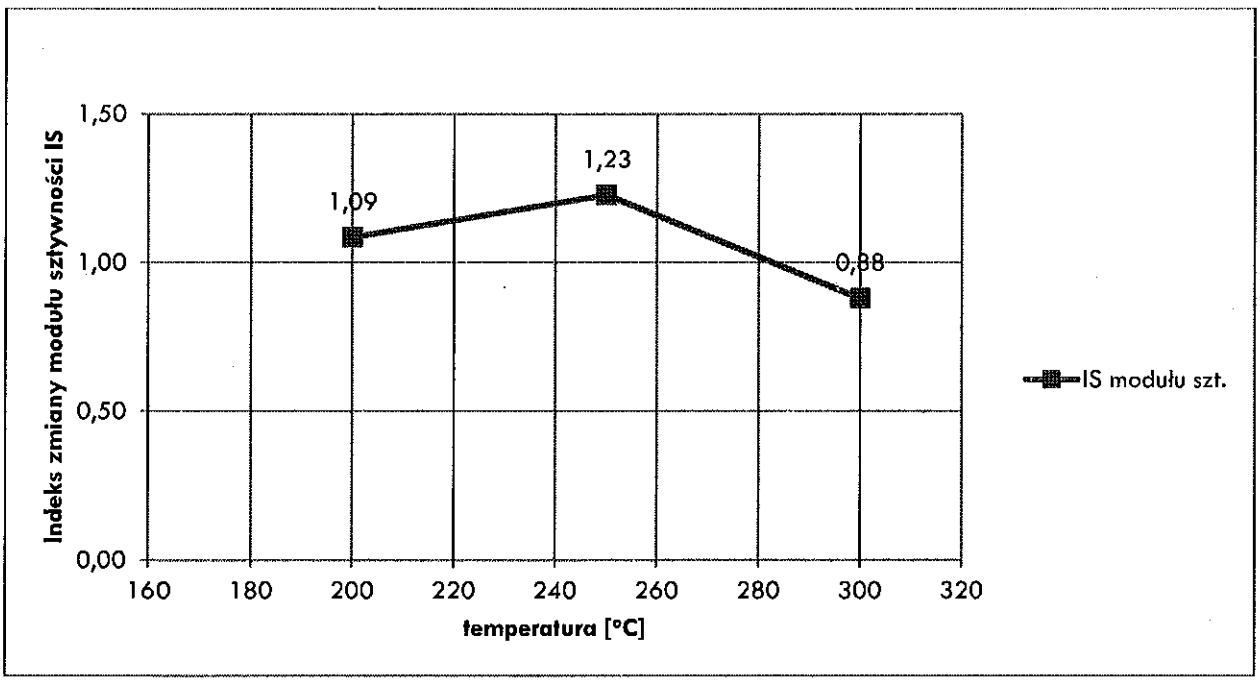
Oznaczenie próbki	Temperatura wygrzewania [°C]	Zagłębienie trzpienia w [mm] odczytane po czasie badania:						
		1 minuta	2 minuta	4 minuta	8 minuta	15 minuta	30 minuta	60 minuta
M_X	-	8,76	11,60	11,66	11,68	11,68	11,68	11,69
M_200	200	8,01	10,92	11,65	11,67	11,67	11,68	11,68
M_250	250	4,91	6,73	9,18	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



Rys. 4-39. Indeks zmiany twardości (penetracja stemplem po 30 minutach badania) mastyksu izolacyjnego w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

Tablica 4-25. Wyniki badań modułu sztywności mastyksu do izolacji mostowych

Oznaczenie próbki	Temperatura wygrzewania [°C]	Kierunek badania (x do y = 90°)	Moduł sztywności [MPa]
M_X_x	-	x	2529
M_X_y	-	y	2480
M_X	-	średnia	**2505**
M_200_x	200	x	2745
M_200_y	200	y	2690
M_200	200	średnia	**2718**
M_250_x	250	x	3158
M_250_y	250	y	2992
M_250	250	średnia	**3075**
M_300_x	300	x	2325
M_300_y	300	y	2082
M_300	300	średnia	**2204**



Rys. 4-40. Indeks zmiany modułu sztywności mastyksu izolacyjnego w funkcji temperatury wygrzewania lepiszcza

Na podstawie analizy wyników badań zmian twardości mastyksu do izolacji mostowych i zmian modułu sztywności zestawionych w Tablicach 4-24 do 4-25 i na Rys. 4-39 do 4-40 można stwierdzić, że:

1. Badanie penetracji stemplem wykazało, że mastyks izolacyjny pod wpływem oddziaływania temperatury 200°C charakteryzuje się nieznacznymi zmianami indeksu twardości do 12%. Mastyks wygrzewany w temperaturze po wygrzewaniu w temperaturze 250°C wskazuje na nieznaczne uplastycznienie. W wyniku wygrzewania w temperaturze 300°C obserwuje się znaczne utwardzenie, które jest wynikiem, co może być spowodowane zmianą w budowie koloidalnej lepiszcza spowodowaną wysoką temperaturą.
2. Badanie modułu sztywności IT-CY wykazało, że mastyks izolacyjny w miarę wzrostu temperatury wygrzewania 200 i 250°C wykazuje wzrost modułu. Moduł sztywności w temperaturze 300°C jest niższy od modułu sztywności asfaltu wyjściowego, co może być spowodowane utrata lepkosprężystych właściwości mastyksu.

LITERATURA

[1] Gaweł I., Kalabińska M., Piłat J.: Asfalty drogowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2001

[2] Piłat J., Radziszewski P.: Nawierzchnie asfaltowe, WKŁ, Warszawa 2010

[3] Sarnowski M.: Modyfikacja asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie kształtowania właściwości reologicznych i adhezji. Rozprawa doktorska. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2011

[4] Danowski M.: Nawierzchnie z dodatkiem asfaltu naturalnego Trynidad. Nawierzchnie asfaltowe 2/2009, str. 7-13

PODSUMOWANIE, WNIOSKI

Niniejszy raport jest raportem częściowym, dotyczącym punktów 1 do 4 projektu.

Podsumowanie i ostateczne wnioski z badań zostaną sformułowane po zakończeniu całego programu badawczego i zostaną zamieszczone w raporcie końcowym.