

PIOTR JASKUŁA¹⁾

NISZCZĄCE ODDZIAŁYWANIE WODY I MROZU NA MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWE – PRZEGLĄD LITERATURY²⁾

STRESZCZENIE. Na podstawie przeglądu dotychczasowych prac badawczych polskich i głównie zagranicznych przedstawiono wpływ istotnych czynników na adhezję i odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu. Omówiono wpływ właściwości asfaltu, rodzaj kruszywa i środka adhezyjnego (ciekłe aminy tłuszczowe i wapno hydratyzowane) oraz wpływ zawartości wolnych przestrzeni w mieszance mineralno-asfaltowej i odwodnienia nawierzchni. Przedstawione zostały mechanizmy i teorie adhezji oraz mechanizmy zniszczeń połączenia asfaltu i kruszywa. Ponadto omówiono metody zwiększania odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu.

1. WSTĘP

W ostatnim okresie w Polsce nasilił się problem przedwczesnych zniszczeń nawierzchni asfaltowych powodowanych oddziaływaniem wody oraz łącznie wody i mrozu. Konsekwencją tych zniszczeń jest odmywanie asfaltu z powierzchni kruszywa, które powoduje odrywanie się ziaren kruszywa, łuszczenie i rozluźnienie się mieszanki

¹⁾ dr inż. – adiunkt w Zakładzie Budowy Dróg Politechniki Gdańskiej

²⁾ artykuł stanowi fragment pracy doktorskiej autora

mineralno-asfaltowej (rys. 1). Niekiedy zniszczenia te przyjmują postać nieregularnych spękań lub deformacji, prowadząc do całkowitej degradacji nawierzchni (rys. 2).



Rys.1. Zniszczenia powierzchniowe powodowane niszczącym oddziaływaniem wody i mrozu (z prawej zbliżenie)
Fig.2. Surface distresses due to deteriorating effects of water and frost (close-up at right side)



Rys.2. Nieregularne spękanie nawierzchni powodowane niszczącym oddziaływaniem wody i mrozu (z prawej zbliżenie)
Fig.2. Irregular cracks of pavement due to deteriorating effects of water and frost (close-up at right side)

Jest to obecnie bardzo istotny problem w Polsce, z dwóch następujących powodów. Pierwszym jest fakt, że w połowie lat 90-tych wprowadzono w Polsce nowe wymagania dotyczące betonów asfaltowych odpornych na deformacje trwałe. Były one reakcją na gwałtowne koleinowanie się polskich dróg asfaltowych. Nowe wymagania wprowadziły zasadę stosowania kruszyw i piasków łamanych wysokiej jakości, wykluczyły stosowanie piasków naturalnych i ograniczyły znacznie zawartość asfaltu. Poprzednio, w betonie asfaltowym według PN-74/S-96022 zawartość asfaltu w warstwie ścieralnej wynosiła około 6,3%, obecnie – mieści się w przedziale 5 ÷ 5,5%. Stare betony asfaltowe były łatwe do zagęszczenia, nie były stabilne, ale były trwałe. Nowe betony asfaltowe, ze 100% zawartością ziaren łamanych, z małą zawartością urabialnej zaprawy, są trudniej zagęszczalne. Sprawia to, że nowo wbudowane mieszanki są wrażliwe na oddziaływanie wody i mrozu, które w polskim klimacie jest niezwykle surowe (częste opady i liczne przejścia przez 0°C).

Drugim powodem jest coraz częstsze stosowanie kruszyw o bardzo zróżnicowanym składzie petrograficznym. Poprzednio do betonów asfaltowych w wielu regionach kraju stosowano kruszywo bazaltowe, o bardzo dobrej adhezji z asfaltem. Obecnie sytuacja uległa zmianie. Bardzo popularne są kruszywa ze skał granitowych pochodzące z południowej Polski, a w Polsce Północnej sprowadzane drogą morską ze Skandynawii i Wielkiej Brytanii. Kruszywa te charakteryzują się kwaśnym odczynem i słabym powinowactwem do asfaltu.

Część nawierzchni wybudowanych z betonu asfaltowego, zaprojektowanego według nowych zasad, w ostatnich kilku latach zachowuje się bardzo dobrze. Jednak są nawierzchnie, które wykazują bardzo duże uszkodzenia powierzchniowe związane z działaniem wody i mrozu. Uszkodzenia takie widoczne są na niektórych nowobudowanych odcinkach już po pierwszej zimie.

Biorąc pod uwagę wprowadzone zmiany, dotyczące technologii mieszanek mineralno-asfaltowych badanie odporności na działanie wody i mrozu wydaje się być koniecznym elementem przy ich projektowaniu, aby wyeliminować przedwczesne zniszczenia. Jednocześnie znajomość istotnych czynników wpływających na siłę połączenia asfaltu i kruszywa pozwoli ulepszać mieszanki, czyniąc je mniej wrażliwymi na oddziaływanie wody i mrozu.

W artykule tym przedstawiono - na podstawie przeglądu dotychczasowych prac badawczych - wpływ istotnych czynników na adhezję i odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu, mechanizmy i teorie adhezji, mechanizmy zniszczeń połączenia asfaltu i kruszywa oraz omówiono metody badań tego zjawiska, jak i przedstawiono metody zapobiegania.

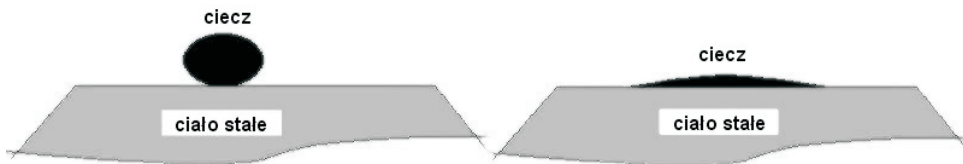
2. WŁAŚCIWOŚCI LEPISZCZA

Siła destrukcyjnego działania czynników atmosferycznych zależy od rodzaju materiałów użytych do mieszanek mineralno-asfaltowych, a ściślej mówiąc od powiązania

na powierzchni styku asfaltu z kruszywem. Lepiszczem, materiałem mającym tworzyć silne połączenie w mieszance, jest asfalt. Jego właściwości zmieniają się w zależności od metody produkcji, pochodzenia ropy naftowej, z której jest produkowany asfalt, jej typu i konsystencji.

W ujęciu fizyko-chemicznym zagadnienie kontaktu ciał: lepiszcze – materiał mineralny jest związane ze zdolnością zwilżania powierzchni ciała stałego przez asfalt. Zdolność ta zależy przede wszystkim od lepkości zwilżającego lepiszcza i jego napięcia powierzchniowego [1].

Napięcie powierzchniowe i wolna energia powierzchniowa są parametrami, które często używane są zamiennie. Powierzchnia rozdziału faz pomiędzy cieciami a gazami zachowuje się tak jakby była pod wpływem siły, zwanej napięciem powierzchniowym, mającej wpływ na kurczenie się tejże powierzchni. Napięcie powierzchniowe powoduje tworzenie się nie zrównoważonych sił przyciągania pomiędzy molekułami powierzchniowymi. Wewnętrzne molekuły są równomiernie rozłożone i zorientowane we wszystkich kierunkach, w przeciwieństwie do powierzchniowych molekuł, zorientowanych do wewnątrz i wywierających ciśnienie na ciecz [2]. Stopień zwilżania, który zależy od wzajemnego przyciągania molekuł lepiszcza i kruszywa, jak i sił przyciągania wewnętrznych molekuł lepiszcza przedstawiono na rysunku 3. Silne oddziaływanie molekularne lepiszcza wytwarza duże napięcie powierzchniowe, co powoduje słabe zwilżanie kruszywa przez to lepiszcze. Wzrost zwilżania występuje w momencie spadku napięcia powierzchniowego czy wolnej energii powierzchniowej lepiszcza [2].

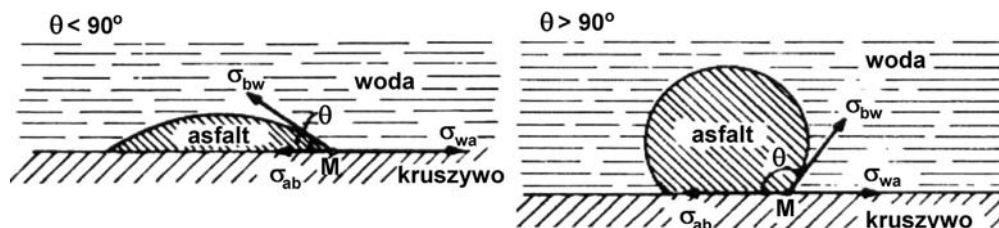


Rys.3. Schemat przedstawiający wpływ napięcia powierzchniowego cieczy na powierzchni ciała stałego na zwilżenie [2]

Fig.3. Influence of a liquid surface tension on the wetting on solid surfaces [2]

Z tymi parametrami ściśle związana jest inna wielkość tzw. kąt zwilżania, czyli kąt styku cieczy (asfalt) zwilżającej powierzchnię ciała stałego (kruszywa) na granicy trzech faz: lepiszcza, kruszywa, wody [3].

Rysunek 4 przedstawia siły międzyfazowe w punkcie M, miejsce styku kruszywa i asfaltu w obecności wody.



Rys.4. Kąt zwilżania, napięcia międzyfazowe [2]
Fig.4. Wetting angle, interfacial tension [2]

Równowagę sił w punkcie M wyraża równanie:

$$\sigma_{wa} = \sigma_{ab} + \sigma_{bw} \cdot \cos \theta , \quad (1)$$

gdzie:

- σ_{wa} – napięcie międzyfazowe między wodą a kruszywem,
- σ_{ab} – napięcie międzyfazowe między kruszywem a asfaltem,
- σ_{bw} – napięcie międzyfazowe między wodą a asfaltem,
- θ – kąt zwilżania.

Kąt zwilżania może być wyrażony w postaci równania:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{wa} - \sigma_{ab}}{\sigma_{bw}} . \quad (2)$$

Z dobrą zdolnością zwilżania mamy do czynienia, gdy $\cos \theta > 0$, czyli $\theta < 90^\circ$. Ze słabą zdolnością zwilżania mamy do czynienia, gdy $\cos \theta < 0$, czyli $\theta > 90^\circ$.

Lepkość i temperatura są dwiema zależnymi właściwościami wskazującymi na poziom ruchliwości molekularnej i wielkość sił przyciągających w cieczy. W momencie wzrostu temperatury lepszczą siły przyciągania i napięcie powierzchniowe maleją, powodując wyższy poziom zwilżania. Stosowane powszechnie drogowe lepszczą bitumiczne w temperaturze pokojowej mają wysoką lepkość i małą zdolność do otaczania kruszywa. Do zwiększania zdolności zwilżania kruszyw przez lepszczą bitumiczne, stosuje się wysoką temperaturę mieszania w otaczarce. Shell zaleca zakres lepkości asfaltu $0,2 \div 0,5$ Pas dla właściwego otoczenia kruszywa i przeciwdziałania spływaniu lepszczą podczas transportu i przestojów podczas wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych [4]. W pracy [5] wykazano, że

zwilżanie kruszywa przez asfalt ma istotne znaczenia na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na działanie wody i mrozu. Wiadomym jest, że asfalty o wyższej lepkości są bardziej odporne na odmycie przez wodę niż te o niższej lepkości [2].

Asfalty mające wysoki stopień aromatyczności, gęsto spakowane molekuly (wysoką lepkość) mają wysoką wytrzymałość na rozciąganie i zwiększone odkształcenie podczas rozerwania [2], [6].

Z większości przestudiowanych prac, wynika, że istotnie znaczące są chemiczne cechy asfaltu (skład grupowy, polarność itp.), które wpływają na połączenie z kruszywem. Jednocześnie z prac tych wynika, że ważniejszą rolę w połączeniu kruszywa i asfaltu pełni jednak kruszywo [7 - 9]. Ze względu na specjalizację zawodową autora, którą jest inżynieria lądowa, bardziej skomplikowane zagadnienia związane z cechami chemicznymi asfaltu nie będą w tym artykule omawiane.

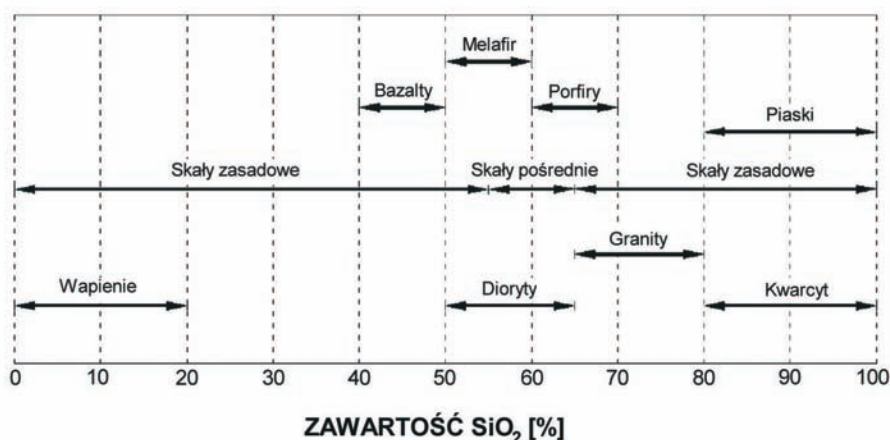
3. WŁAŚCIWOŚCI KRUSZYWA

Kruszywa mineralne silniej lub słabiej łączą się z asfaltem w zależności od składu mineralogicznego (w szczególności zawartości krzemionki SiO_2) i ich właściwości fizycznych. Skład mineralogiczny jest głównym czynnikiem odpowiedzialnym za połączenie kruszywa i asfaltu, czyli zjawiska adhezji [2], [8]. Kruszywa, tak jak inne materiały mają nierównoważony ładunek powierzchniowy, którego efektem jest istnienie potencjału, czy też energii powierzchniowej. Gdy powierzchnię minerału pokryjemy cieczą o przeciwnej polarności, wówczas następuje równowaga energetyczna tworząca trwałą więź dwóch ośrodków. Ciecz, która jest w stanie pokryć większe zasoby energetyczne kruszywa tworzy mocniejsze, bardziej trwałe połączenie. Jednakże w momencie, gdy występuje adhezja dwóch cieczy do jednego agregatu i jedna z cieczy zrównoważy większy potencjał energetyczny kruszywa, wówczas istnieje możliwość zastąpienia, czy też wymiany cienkiej otoczki drugiej cieczy pokrywającej kruszywo. Zjawisko to jest określane odmyciem (ang. „*stripping*”) cieczy z powierzchni ciała stałego, czy asfaltu z kruszywa, czyli zastąpienie lepiscza asfaltowego na powierzchni kruszywa cienką otoczką wody.

W związku z powyższym kruszywa generalnie można podzielić na dwie grupy: kruszywa hydrofobowe i hydrofilowe [2]. Kruszywa hydrofobowe to takie, które mają mniejsze powinowactwo z wodą, a większe z asfaltem. Oznacza to, że asfalt potrafi zrównoważyć większe powierzchniowe zasoby energetyczne kruszywa. Kruszywa hydrofilowe mają zaś większe powinowactwo z wodą niż z asfaltem.

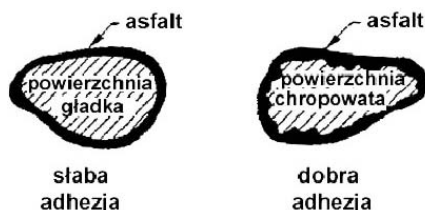
Kruszywa o niskiej zawartości krzemionki SiO_2 ($< 55\%$), nazywane w uproszczeniu „zasadowymi”, (bowiem wszystkie kruszywa są mieszaniną alkalicznych i kwaśnych minerałów [10]) należą do grupy kruszyw hydrofobowych. Charakteryzują się one dużą przyczepnością do asfaltu, co daje trwałe, silne wiązanie na powierzchni styku. Dzięki temu bez obaw stosowane są w nawierzchniach asfaltowych. Kruszywa

o wyższej zawartości krzemionki SiO_2 ($> 65\%$) zwane „kwaśnymi”, takie jak granit i kwarcyt (rys. 5), wykazują niską przyczepność do asfaltu, przez co zastosowanie ich bywa ograniczone, bądź też w takim przypadku produkt końcowy, czyli mieszanka mineralno-asfaltowa, może charakteryzować się niską odpornością na działanie wody i mrozu.



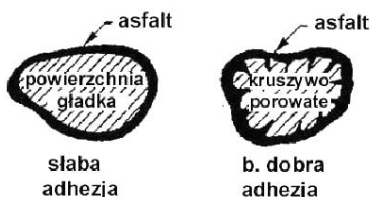
Rys.5. Podział skał ze względu na kwasowość
Fig.5. Acidity of rocks

Właściwości fizyczne kruszywa, takie jak szorstkość, chropowatość, porowatość i zapylenie, mają znaczny wpływ na powiązanie asfaltu z kruszywem [2], [11]. Tekstura powierzchniowa kruszywa wpływa na zwilżanie kruszywa asfaltem i na wytrzymałość wiązania. Powierzchniowe nierówności mogą kryć drobne cząsteczki wody, które następnie penetrują i osłabiają styk wiązania asfaltu i kruszywa. Z drugiej strony, rozbudowana tekstura kruszywa umożliwia dobre zaczepienie asfaltu przy jednoczesnym zwiększeniu powierzchni styku (rys. 6). W wyniku tego zmniejsza się naprężenie na połączeniu przy jednakowej sile adhezji.



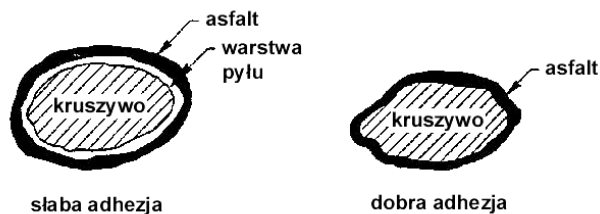
Rys.6. Wpływ tekstury powierzchniowej kruszywa na adhezję
Fig.6. Influence of aggregate surface texture on adhesion

Występowanie porów, szczelin i kapilar na powierzchni kruszywa umożliwia penetrację lepiscza w głąb, przez co wzmacnia fizycznie połączenie [2]. Dodatkowo w czasie procesu produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej, gorące kruszywo utrzymuje uwięzione powietrze w szczelinach. W momencie ochładzania się kruszywa wytwarza się podciśnienie, które zasysa asfalt z powierzchni kruszywa (rys. 7), tworząc silniejsze powiązanie [2].



Rys.7. Wpływ porowatości kruszywa na adhezję
Fig.7. Influence of aggregate porosity on adhesion

Kruszywo często jest osłonięte warstwą pyłów lub pokryte cząstkami wody (rys. 8). Obecność tych czynników na powierzchni kruszywa obniża możliwość zwilżania i pokrywania kruszywa asfaltem, jak i osłabia wytrzymałość połączenia [2], [12].



Rys.8. Efekt pokrycia kruszywa warstwą pyłu
Fig.8. Effect of thin dust coating over the grains

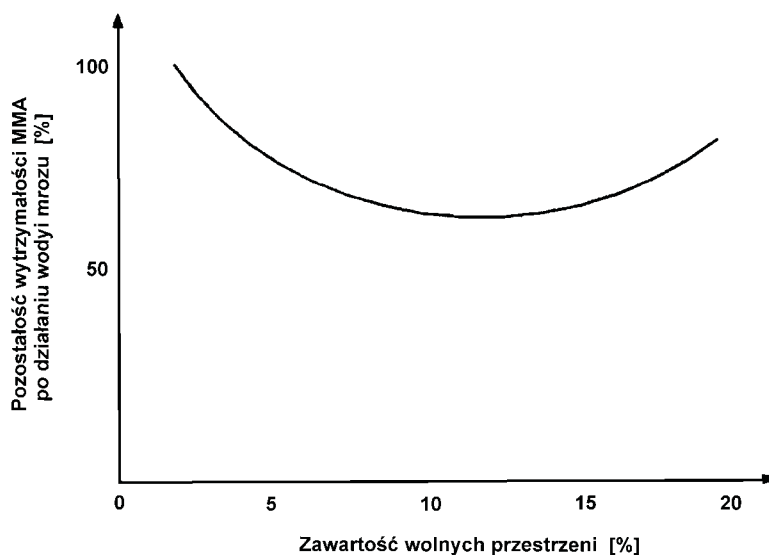
4. WŁAŚCIWOŚCI MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWEJ

Wiele cech mieszanki mineralno-asfaltowej ma wpływ na odporność na działanie wody i mrozu. Najważniejszymi z nich są:

Zawartość wolnych przestrzeni / przepuszczalność

Wielkość ta ma duży wpływ na odporność mieszanki na działanie wody i mrozu, [13 - 19]. Mieszanki o zawartości wolnych przestrzeni rzędu 8-10% są najbardziej narażone na działanie wody [20], co jest nazwane efektem „najgorszej zawartości

wolnych przestrzeni (ang. *pessimium voids*)” [19] (rys. 9). Mniej „wrażliwe” są te mieszanki, które zawierają ponad 12% wolnych przestrzeni (woda może swobodnie odpłynąć z mieszanki). Najmniej wrażliwe są zaś te o zawartości wolnych przestrzeni poniżej 3-5% (są mało lub nieprzepuszczalne). W opozycji do koncepcji „*pessimium voids*” wyniki swoich badań przedstawił Jimenez (komentarz do pracy [13]), stwierdzając, że w przedziale 3 ÷ 14% odporność na działanie wody i mrozu spada liniowo, wraz ze wzrostem zawartości wolnych przestrzeni.



Rys.9. Zależność między resztkową wytrzymałością mieszanki mineralno-asfaltowej po oddziaływaniu wody i mrozu (TSR) a zawartością wolnych przestrzeni [20]
Fig.9. Relationship between retained tensile strength (TSR) and air voids content [20]

Ilość wolnych przestrzeni nie determinuje jednak tego, czy woda dostanie się do nawierzchni, czy też nie. Badania dowiodły, że mieszanki o podobnej zawartości wolnych przestrzeni mogą znacząco różnić się, jeżeli chodzi o przepuszczalność [21]. Wynika to przede wszystkim ze składu mieszanki, a mianowicie różnego rodzaju kruszywa oraz różnej zawartości poszczególnych frakcji. Wewnętrzna struktura mieszanki decyduje o przepuszczalności, nie zaś tylko zawartość wolnych przestrzeni. W związku z tym badanie przepuszczalności może lepiej określać wrażliwość danej mieszanki na działanie wody i mrozu niż sama tylko zawartość wolnych przestrzeni.

Zawartość wolnych przestrzeni wypełnionych asfaltem

W pracach [22 - 24] przedstawiono zależność zawartości wolnych przestrzeni wypełnionych asfaltem (VFB) i odporności na odmywanie asfaltu z powierzchni kruszywa. Wysoka odporność na odmywanie jest wtedy, gdy: $VFB > 80\%$; wątpliwa, gdy: $60\% < VFB < 80\%$; niska, gdy: $VFB < 60\%$.

5. INNE CZYNNIKI

Poza właściwościami kruszywa, asfaltu oraz mieszanki mineralno-asfaltowej również czynniki zewnętrzne (tabl. 1) mają wpływ na odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody mrozu.

Z obserwacji przeprowadzonych przez badaczy amerykańskich wynika, że złe odwodnienie powierzchniowe i/lub wgłębne powoduje wprowadzenie wody lub pary wodnej do konstrukcji nawierzchni, co może być przyczyną przedwczesnego wystąpienia zniszczeń indukowanych przez wodę i mróz [25 - 26].

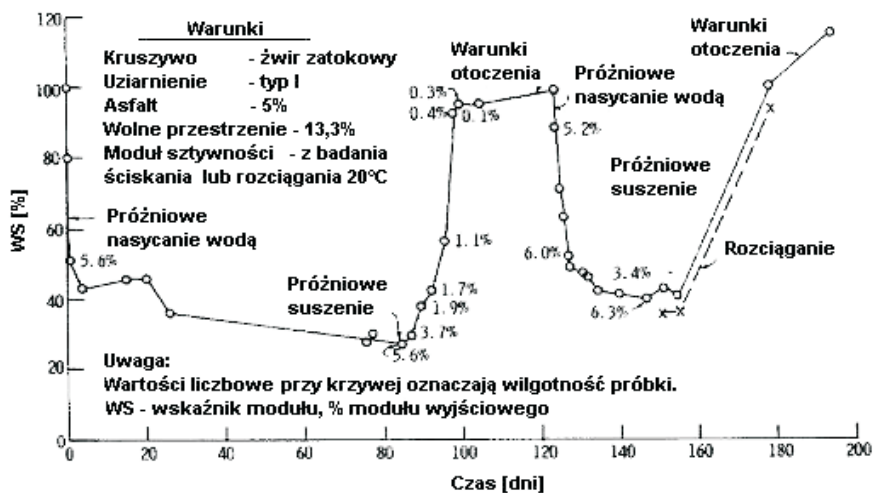
Woda może dostać się do nawierzchni w różny sposób: z powierzchni poprzez powierzchniowe spękania; w wyniku przesączania się z rowów; oraz na drodze kapilarnego podciągania wody z gruntu, przez podbudowę aż do spodu warstw bitumicznych (szczególnie w przypadku spękanych podbudów z chudego betonu czy stabilizacji gruntu/kruszywa cementem). Wyżej woda jest z reguły podciągana w postaci pary wodnej. Para wodna tworzy się z reguły w ciągu dnia, gdy nawierzchnia się rozgrzewa. Penetruje beton asfaltowy wypełniając coraz większe ilości wolnych przestrzeni. Nocą, gdy temperatura nawierzchni obniża się para wodna ulega skropleniu. Podczas tego procesu (wysoka temperatura/niska temperatura, parowanie/skraplanie) może dojść do wytworzenia ciśnienia w porach rzędu 140 kPa. Dodatkowo ciśnienie to zwiększane jest przez naprężenia (siły) indukowane przez pojazdy poruszające się po drodze. Może być wówczas na tyle duże, że zerwie połączenie kruszywo-asfalt umożliwiając wodzie łatwiejszy dostęp do kruszywa i rozpoczęcie procesu „odmywania” [26].

Kandhal w pracy z 2001 roku [26] stwierdza, że w ostatnim czasie sporo problemów dotyczących zniszczeń wywoływanych przez wodę i mróz pojawiło się w przypadku remontu starych nawierzchni z zastosowaniem tzw. „nakładek” z mieszanek mineralno-asfaltowych. Nowe, nieprzepuszczalne warstwy bitumiczne powodują zatrzymanie wody zawartej w starej nawierzchni. W następstwie tego dochodzi do degradacji nawierzchni (starej, jak i nowej) według takiego samego schematu jak w przypadku niewłaściwego odwodnienia. Proces ten może być przyspieszony, gdy nową, gorącą masę asfaltową nakładamy na nasyconą wodą, starą nawierzchnię. Wysoka temperatura przyspiesza parowanie wody znajdującej się w zdegradowanej nawierzchni. Aby zminimalizować ryzyko wystąpienia przedwczesnych uszkodzeń nawierzchni wywołanych przez wodę i mróz należy podczas remontów:

- usprawnić system drenażowy konstrukcji nawierzchni celem odciążenia dopływu wody z boków (zaniedbane rowy) oraz przede wszystkim z gruntu przez system kapilar; sprawny system umożliwi również odpłynięcie wody nagromadzonej w starej, spękanej nawierzchni,
- zapobiec układaniu nowych warstw bitumicznych na nasyconą wodą (wręcz moką), starą nawierzchnię.

Schmidt i Graf przedstawili zmiany sztywności mieszanki pod wpływem cyklicznego oddziaływania wody, które to istotnie osłabia mieszankę mineralno-asfaltową. Na

rysunku 10 przedstawiono zmianę sztywności MMA w czasie przy zmiennym poziomie nasycenia wodą (wilgotność) mieszanki (wartości przy krzywej).



Rys.10. Wpływ cyklicznego oddziaływania wody na sztywność mieszanki [27]
Fig.10. Effect of cycling moisture on stiffness of asphalt mix [27]

Tablica 1. Czynniki wpływające na przyczepność asfaltu do kruszywa [4]
Table 1. Factors affecting the adhesion between bitumen and aggregate [4]

Właściwości kruszywa	Właściwości asfaltu	Właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej	Czynniki zewnętrzne
<ul style="list-style-type: none"> - skład mineralogiczny, - tekstura powierzchni, - porowatość, - zapylenie, - wielkość powierzchni ziaren, - zdolność wchłaniania asfaltu, - wilgotność, - kształt ziaren, - stopień zwietrzenia. 	<ul style="list-style-type: none"> - właściwości reologiczne, - polarność elektryczna, - budowa. 	<ul style="list-style-type: none"> - zawartość wolnych przestrzeni, - przepuszczalność, - zawartość asfaltu, - grubość błonki asfaltu na ziarnach kruszywa, - rodzaj wypełniacza, - uziarnienie, - rodzaj mieszanki. 	<ul style="list-style-type: none"> - opady deszczu, wilgotność, - kwasowość wody (pH), - obecność soli, - temperatura otoczenia, - cykl temperaturowy, - obciążenie ruchem, - projekt konstrukcji nawierzchni, - projekt konstrukcji nawierzchni, - wykonawstwo, - odwodnienie.

W tablicy 1 zestawiono wpływ różnych właściwości kruszywa, asfaltu, mieszanki mineralno-asfaltowej i czynników zewnętrznych na przyczepność asfaltu do kruszywa.

6. MECHANIZMY I TEORETYCZNE MODELE ADHEZJI

W rozdziale tym przedstawiono kilka teorii wyjaśniających zjawisko adhezji, które zebrali i przedstawili Majidzadeh i Brovold [2].

Model mechaniczny

Według teorii mechanicznej, głównym elementem rozważań jest tekstura powierzchni kruszywa i mechaniczne połączenie lepiszcza z jej powierzchnią. Teoria zakłada, że wciśnięcie lepiszcza w pory i inne nieregularności powierzchni kruszywa stanowi siłę tego połączenia. W takim przypadku, jeśli zaistnieje dokładniejsze zwilżanie, powstała więź będzie znacznie silniejsza niż na gładkiej powierzchni. Jednak powietrze często jest uwięzione w porach i szczelinach, co przedwcześnie osłabia połączenie. Zwolennicy tej teorii twierdzą, że główny wpływ na dobre połączenie ma tekstura powierzchni kruszywa, która zależy od składu mineralogicznego.

Model ułożenia molekuł

Według teorii orientacji molekuł, kiedy molekuły asfaltu są w kontakcie z molekułami kruszywa, same ułożą się odpowiednio, aby zbilansować maksymalne zasoby energetyczne powierzchni kruszywa. Zwolennicy tej teorii twierdzą, że odpowiednie ustawienie się molekuł w cieczy może być efektem oddziaływania układu jonów powierzchni ciała stałego tak, iż jest zgodne z ich polaryzacją.

Model energii międzyfazowej

Teoria energii międzyfazowej, jest obecnie bardziej uznawana niż pozostałe. Rozważa ona adhezję jako zjawisko termodynamiczne związane z energią powierzchniową materiałów powiązanych. Zwilżanie czy powlekanie ciała stałego cieczą, a także odmywanie lepiszcza od kruszywa jest zależne od zmian wolnej energii w układzie. Teoria nie zakłada, w odniesieniu do struktury molekularnej międzycząsteczkowych właściwości fizycznych sił międzycząsteczkowych, odpowiedzialności za adhezję. Nie dostarcza także informacji o siłach potrzebnych do oddzielenia łączonych spoiwem pary materiałów. Teoria kładzie nacisk na polarność, ułożenie molekuł, które są odpowiedzialne za adhezję. Ciecze biegunowe (polarne), które mają lepsze możliwości redukcji ich energii powierzchniowych, w trwałych termodynamicznych warunkach minimalnej energii powierzchniowej są bardziej przyciągane do powierzchni kruszywa niż niepolarne (niebiegunowe) ciecze. Koncepcja ta może być użyta do

wytlumaczenia odmywania i odrywania lepiszcza asfaltowego z powierzchni kruszywa przez wodę będącą cieczą wysoko spolaryzowaną.

Model reakcji chemicznych

Teoria zakłada, że zjawisko adhezji występuje pomiędzy związkami chemicznymi kruszywa i asfaltu. Zgodnie z tą teorią podzielono kruszywa na kwaśne i zasadowe, o różnej przyczepności do asfaltu.

7. MECHANIZMY ZNISZCZEŃ

Generalnie uszkodzenia połączenia asfalt-kruszywo można podzielić na dwie kategorie: utratę kohezji i utratę adhezji [18].

Utrata kohezji

W przypadku utraty kohezji płaszczyzna zniszczenia jest zlokalizowana wewnątrz lepiszcza oddzielającego i łączącego ziarna kruszywa. Utrata kohezji, którą można wyjaśnić poprzez analizę reologiczną lepiszcza i agregatu, występuje w mieszankach z suchym i czystym kruszywem.

Utrata adhezji

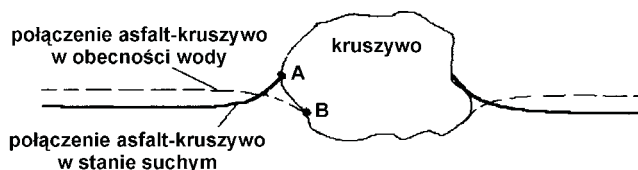
Utrata adhezji charakteryzowana jest jako kompleksowe lub częściowe zniszczenie powierzchni międzyfazowej połączenia lepiszcza i agregatu. W obecności wody i często ekstremalnych warunków środowiskowych obserwuje się w mieszankach mineralno-asfaltowych utratę adhezji. Generalnie jest ona następstwem ekstremalnych warunków obciążeniowych, jak i koncentracji naprężeń wywoływanej przez wady i nieregularności powierzchni kruszywa. Utrata adhezji powodowana przemieszczeniem, odmyciem lepiszcza z powierzchni kruszywa przez wodę analizowana jest poprzez zasady termodynamiki.

Majidzadeh i Brovold [2] oraz Fromm [28] przedstawili szereg, istniejących koncepcji uszkodzeń połączenia asfalt-kruszywo, które można sklasyfikować jako: koncepcja wypierania, model odrywania, model przerwania warstewki asfaltu i model ciśnienia porowego, spontanicznej emulgacji asfaltu oraz chemicznego przerwania i model osmozy.

Koncepcja wypierania

Wypieranie czy odmywanie asfaltu z powierzchni kruszywa przez wodę jest dobrze znanym zjawiskiem, które jest następstwem utraty adhezji w nawierzchniowych mieszankach mineralno-asfaltowych [2], [11], [18], [28 - 29]. Koncepcja ta wiąże mechanizm zniszczenia z pozostawianiem w równowadze części kruszywa

zagłębione w warstewce asfaltu (rys. 11). Kontakt kruszywa z asfaltem jest znacznie większy, gdy układ kruszywo-asfalt jest w stanie suchym (punkt A). Gdy pojawia się obecność wody połączenie asfalt-kruszywo przestaje pozostawać w równowadze i powierzchnia styku zmniejsza się i przemieszcza (punkt B).



Rys.11. Oddziaływanie na styku lepiszczce/woda na powierzchni kruszywa w obecności wody [2]

Fig.11. Reaction of the binder/water interface over the aggregate surface in the presence of water [2]

Doświadczenia laboratoryjne i terenowe wykazują duży wpływ lepkości asfaltu na odmycie asfaltu z kruszywa. Nawierzchniowe mieszanki mineralno-asfaltowe w chwili wbudowywania (lepkość asfaltu jest niska) i występowania opadów atmosferycznych mogą wykazywać wysoki poziom odmycia asfaltu z kruszywa i utraty adhezji.

Model odrywania

Teoria dotyczy przypadku, gdy lepiszczce asfaltowe jest oddzielane od pojedynczych ziaren kruszywa, podczas gdy otoczka asfaltu pozostaje w stanie nienaruszonym; kruszywo jest otoczone asfaltem, lecz brak jest adhezji pomiędzy asfaltem a kruszywem [2], [11], [18], [28 - 29].

Zwykle odrywanie jest przypisywane termodynamicznemu zastąpieniu asfaltu przez cienką warstewkę wody, pochodzącą z kruszywa jak i czasami z asfaltu. Kruszywo zapyłone także ma wpływ na odrywanie asfaltu. Istnieją trzy przyczyny odrywania asfaltu powodowanego wodą:

- przepływ wilgotnego powietrza w otwartych mieszankach mineralno-asfaltowych,
- bezpośredni kontakt z wodą w nasiąkniętych mieszankach,
- woda uwięziona w kapilarach kruszywa.

Bardzo ważnymi elementami w ocenie odrywania asfaltu jest charakterystyka styku dwóch ciał tzn. głównie powierzchni przez skład mineralogiczny i poziom pH kruszywa. Woda dochodząca do powierzchni styku jest w dobrych relacjach z siecią krzemionki w kruszywie. Woda asocjuje z krzemionką tworząc jony wodorotlenowe, które zwiększają pH, przez co przyspieszają proces degradacji. Tłumaczy to częstsze i większe zniszczenia nawierzchni z kruszywami kwarcowymi i kwaśnymi, w stosunku do kruszyw o niższej zawartości krzemionki.

Proces odrywania asfaltu z kruszywa jest zjawiskiem, które jest niemożliwe do łatwego rozpoznania przez proste testy laboratoryjne. Wytrzymałość połączenia kruszywa z asfaltem zależy głównie od rodzaju oddziaływujących naprężeń i reakcji reologicznych materiału.

Zaobserwowano, że:

- gwałtowne pojawienie się naprężeń rozciągających powoduje zniszczenia w warstewce asfaltu,
- pojawienie się dużego naprężenia rozciągającego powoduje wystąpienie pęknięcia, małej rysy w warstwie asfaltu,
- pojawienie się dużych naprężeń, może powodować zerwanie na styku powierzchni z powodu zjawiska korozji.

Model przerwania warstewki asfaltu

W mieszankach asfaltowych, gdzie kruszywo było dobrze otoczone asfaltem, obserwowane odmywanie asfaltu nie może być tłumaczone przez każdą z wcześniej omawianych teorii chyba, że zainicjowane było pęknięcie otoczki asfaltu [2], [11], [28]. Pęknięcie otoczki asfaltu najczęściej powodowane jest ostrymi krawędziami ziaren kruszywa tam, gdzie otoczka jest najcieńsza. Powodowane to może być przez siły pochodzące od dynamicznego oddziaływania ruchu samochodowego. Wówczas woda styka się z kruszywem i zastępuje asfalt na powierzchni kruszywa tak jak to przedstawiono wcześniej.

Model ciśnienia porowego

Kolejna teoria zakłada, że powodem zniszczeń jest tworzenie się ciśnienia w porach mieszanki [2], [11], [18], [29 - 30]. W mieszankach o wysokiej zawartości wolnych przestrzeni, takich jak warstwy podbudowy czy warstwy wiążące, woda może łatwo penetrować. Naprężenia powodowane ruchem samochodowym dogęszczają mieszankę, przez co zamykają uwieczoną wodę w wolnych przestrzeniach i uniemożliwiają ruchy wody w mieszance. Zamknięta zaś woda często rozpoczyna mechanizm tworzenia znacznych ciśnień porowych, które odpowiadają za odmywanie asfaltu z kruszywa w mieszankach mineralno-asfaltowych.

Model spontanicznej emulgacji asfaltu

Asfalt w chwili ciągłego, wydłużonego kontaktu z wodą emulguje, tworząc na powierzchni emulsję wodno-olejową koloru szarego lub szaro-brązowego [11], [18], [28], [29]. Prędkość emulgacji zależy od natury samego asfaltu, jak dodatków ulepszących. Gdy emulgacja przejdzie przez całą cienką warstwę asfaltu następuje przerwanie połączenia asfaltu i kruszywa.

Model „pralki”

Odmywanie asfaltu z powierzchni kruszywa powodowane jest praniem hydraulicznym, czyli cyklicznym wypompowywaniem wody tuż przed kołem i wysysaniem wody tuż za kołem poruszającego się pojazdu po nasyconej nawierzchni [11], [29], [31]. Teoria zdobywa coraz więcej zwolenników wraz ze zwiększającym się ruchem na drogach.

Model pełzania

Napięcie powierzchniowe wody w temperaturze pokojowej jest przeszło dwa razy większe od asfaltu [28]. Kiedy asfalt styka się z mieszaniną powietrzno-wodną wraz z upływem czasu poddaje się i może być wessany pomiędzy granicę styku wody i powietrza, pozostawiając krater odpowiadający wielkości pęcherzyka powietrzno-wodnego.

Model chemicznego przzerwania

Chemiczne i elektrostatyczne oddziaływanie pomiędzy wodą a niektórymi kruszywami sprzyjają odrywaniu się asfaltu z powierzchni kruszywa [32].

Model osmozy

Teoria ta zakłada gradient stężenia wokół cienkiej powłoki asfaltu, który przemieszcza wodę przez granicę rozdziału faz, osłabiając połączenie [25].

8. ŚRODKI ADHEZYJNE DO POPRAWY ODPORNOŚCI MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH NA ODDZIAŁYWANIE WODY I MROZU

Zadaniem dodatków adhezyjnych jest polepszenie „wiązania” asfaltu i kruszywa [33]. Są one potrzebne przede wszystkim w przypadku stosowania do mieszanek kruszyw kwaśnych. Obecnie stosowane środki adhezyjne to: ciekłe środki adhezyjne i wapno hydratyzowane. Podobne właściwości adhezyjne wykazuje też cement portlandzki [34 - 35], lecz jest rzadko stosowany.

Ciekłe środki adhezyjne (aminy tłuszczowe)

Ciekłe środki adhezyjne są to związki powierzchniowo czynne, obecnie popularnie stosowane są środki kationoaktywne. To substancje, które zmieniają chemiczno-fizyczny charakter kontaktu między kruszywem a asfaltem. Wprowadzenia środka adhezyjnego do asfaltu zmienia jego aktywność powierzchniową na dodatnią. Powoduje to

zmniejszenie napięcia powierzchniowego asfaltu, poprawiając jego zdolność do otaczania kruszywa [1]. Z reguły środki adhezyjne tego typu nadają się do produkcji różnych rodzajów mieszanek mineralno-asfaltowych. Zarówno tych produkowanych „na zimno” jak i „na gorąco” oraz asfaltów upłynnionych. W mieszankach produkowanych „na gorąco” dodawane są one do asfaltu w ilości od 0,2 do 1,2% w stosunku do masy asfaltu.

Ważną cechą środka adhezyjnego jest tzw. termostabilność, czyli brak zmian jego właściwości mimo wzrostu temperatury, jak i długotrwałego jej oddziaływania. Nie termostabilny środek adhezyjny może wpłynąć na cechy fizyczne asfaltu takie jak, lepkość czy konsystencja. Dalsze konsekwencje takiego stanu rzeczy to gorsza urabialność, zagęszczalność oraz większa wrażliwość termiczna mieszanek mineralno-asfaltowych, a przede wszystkim brak poprawy przyczepności asfaltu do kruszywa. Podobne problemy mogą się pojawić również, gdy dodamy zbyt dużo środka adhezyjnego.

Z prac [1], [36 - 37] wynika, że rodzaj i typ środka adhezyjnego zależy od cech fizyko-chemicznych konkretnego asfaltu i kruszywa. Można, zatem powiedzieć, że nie ma uniwersalnego środka adhezyjnego, który zapewni silne połączenie dowolnego asfaltu i kruszywa.

Wapno hydratyzowane

Wapno hydratyzowane, jak wykazało wiele badań może być z powodzeniem stosowane jako środek adhezyjny [2], [15], [38 - 44]. Ponadto okazuje się, że poza poprawą przyczepności asfaltu do kruszywa zwiększa ono odporność na deformacje trwałe betonu asfaltowego oraz opóźnia jego starzenie [35], [40]. Wapno zwiększa adhezję MMA dzięki kationom wapnia zawartym w CaCO_3 , które łączą się ze związkami krzemu zawartymi w kruszywie, tworząc silne wiązanie jonowe. Stopniowo powierzchnia kruszywa, która początkowo miała charakter kwaśny, zmienia się na zasadowy pod wpływem zwiększającej się liczby kationów wapnia, otaczających powierzchnie kruszywa. Jednocześnie kationy wapnia łączą się z grupami karboksylowymi z asfaltu, co eliminuje ich nieodporne na działanie wody połączenie z powierzchnią kruszywa. Wapno hydratyzowane posiada dodatkową zaletę, redukuje tworzenie się asfaltenów, będących produktem utleniania się asfaltu, przez co hamuje starzenie się asfaltu [35].

Wapno hydratyzowane dodawane jest w ilości około 1,5% w stosunku do mieszanki mineralno-asfaltowej. Jednocześnie o tę samą ilość redukuje się dodatek wypełniacza wapiennego. W trakcie produkcji MMA wapno hydratyzowane dodawane jest do mieszanki mineralnej przed podaniem asfaltu lub jeszcze, gdy kruszywo jest na łańdzie wykazuje najlepsze efekty jako środek adhezyjny [40], [45].

Kandhal w pracy [16] stwierdził, że wapno hydratyzowane jest bardzo efektywnym środkiem adhezyjnym dla większości kruszyw mineralnych. Kennedy w pracy [39], badając wpływ wapna hydratyzowanego i 13 rodzajów ciekłych środków adhezyjnych

na odporność MMA na działanie wody i mrozu wykazał, że wapno lepiej zabezpiecza mieszankę przed oddziaływaniem wody i mrozu. Pozytywne działanie wapna potwierdziły też badania laboratoryjne i terenowe na odcinku doświadczalnym wykonane przez autora.

Modyfikacja asfaltu polimerami

W pracy [46], gdzie badano jeden asfalt wykazano korzystny wpływ polimeroasfaltu, większy niż przy zastosowaniu chemicznego środka adhezyjnego na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na niszczące oddziaływanie wody. Podobne wyniki uzyskano w pracy [47], modyfikując polimerem kruszywo w czasie suszenia w otaczarce, jak i w pracy [48], gdzie badano elastomero i plastomeroasfalty. Wystarczające oddziaływanie elastomeroasfaltu, jako środka poprawiającego adhezję nie zostały potwierdzone w badaniach [49] prowadzonych przez autora artykułu.

9. METODY BADAŃ ODPORNOŚCI MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH NA DZIAŁANIE WODY I MROZU

Od początku lat 30 minionego wieku starano się opracować metodę badawczą określającą odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na oddziaływanie wody i mrozu [18]. Problem polegał na stworzeniu metody, która w warunkach laboratoryjnych symulowałaby zmiany w mieszance mineralno-asfaltowej, zachodzące w obecności wody, temperatury i innych czynników panujących w terenie, powodując utratę wytrzymałości, osłabienie wewnętrznej struktury mieszanki i prowadzącej do zniszczenia. Od tego czasu powstało szereg badań usiłujących ocenić wrażliwość mieszanek mineralno-asfaltowych na wodę i mróz. Generalnie metody te można podzielić na dwie grupy:

1. Badania, w których otoczone asfaltem (z lub bez środka adhezyjnego) wybrane frakcje kruszywa lub luźna mieszanka mineralno-asfaltowa poddawana jest nasycaniu wodą (w temperaturze pokojowej lub też doprowadzając do wrzenia). Odmycie asfaltu z kruszywa, oceniane wizualnie jest miarą wrażliwości na oddziaływanie wody.
2. Badania, w których zagęszczone próbki z mieszanki mineralno-asfaltowej (przygotowywane w laboratorium lub wycinane z gotowej nawierzchni) poddawane są kondycjonowaniu³⁾, czynnościom symulującym warunki panujące na drodze. Wrażliwość na oddziaływanie wody i mrozu oceniane jest przez spadki parametrów mechanicznych takich jak sztywność, czy wytrzymałość (moduł sztywności sprężystej przy pośrednim rozciąganiu, wytrzymałość przy pośrednim rozciąganiu itp.)

³⁾ kondycjonowanie - doprowadzanie materiału do określonego stanu, wg Słownika Języka Polskiego PWN - poddawać nawilżaniu i obróbce termicznej; w literaturze anglojęzycznej określane wyłącznie jako "conditioning"

Dodatkowo można wyodrębnić jeszcze jedną grupę badań:

3. Badania polegające na mierzeniu sił międzyfazowych na granicy trzech ośrodków kruszywo-asfalt-woda. Istnieje możliwość pomiaru poszczególnych sił lub też siły wypadkowej dla całego układu. Są to pomiary bezpośrednie dające konkretne wartości sił, które dość dobrze ilustrują zjawisko adhezji. Mimo tych zalet, metody te nie są powszechnie używane, ponieważ są dość skomplikowane, wymagają dużej precyzji wykonania oraz stworzenia odpowiednich, ciężkich do kontrolowania warunków badania.

BADANIA KRUSZYWA OTOCZONEGO ASFALTEM I LUŻNEJ MIESZANKI

Statyczna kąpiel wodna (ang. *static immersion, Lee test*)

Procedura ustalona w normach AASHTO T182, ASTM D1664 lub jej modyfikacje [2], [18], [50 - 53]. Frakcję 5/9,6 grubego kruszywa miesza się z 5,5% m/m asfaltu w temperaturze 135-150°C i poddaje się zanurzeniu w wodzie destylowanej przy ciśnieniu atmosferycznym w czasie 16-18 godzin. Oceny odmycia dokonuje się wizualnie. Kruszywo odporne na działanie wody nie może wykazywać więcej niż 5% odmycia z asfaltu. Modyfikacje metody polegają na zmianie temperatury wody, czasu zanurzenia i długości okresu odpoczynku próbki po otoczeniu do zanurzenia.

Dynamiczna kąpiel wodna (ang. *dynamic immersion, Nicholson test*)

Procedura jest podobna do statycznego zanurzenia. Jedynym odstępstwem jest wprowadzenie gwałtownych wstrząsów próbki w czasie od 5 do 30 minut [2], [50], [53]. Oceny dokonuje się jak w statycznej kąpeli. Czasami odmycie mierzone jest utratą masy.

Gotowanie (ang. *Riedel and Weber test*)

Test gotowania (ASTM D3625) przeprowadza się dla grubych frakcji kruszywa otoczonych asfaltem lub luźnych MMA poddanych gotowaniu [2], [18], [39], [45], [47], [50 - 55]. Czas gotowania próbki wynosi od 1 do 3 minut, a czasami 10 minut. Oceny wizualnej dokonuje się jak w teście statycznej kąpeli wodnej. W Polsce metoda gotowania została znormalizowana w normie PN-84/B-06714/22.

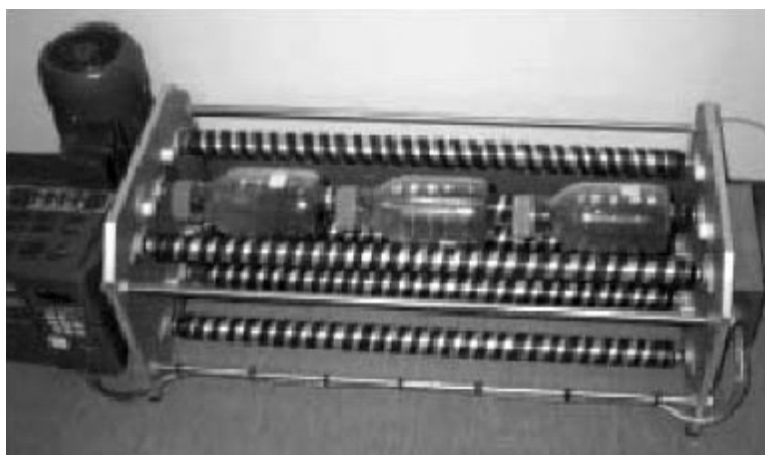
Metoda soli wskaźnikowej

Grube frakcje kruszywa impregnowane są solą wskaźnikową, następnie otaczane asfaltem i poddawane nasyceniu wodą destylowaną przez 16-18 godzin w temperaturze pokojowej i ciśnieniu normalnym [2], [53]. Po nasyceniu stężenie soli w wodzie

określane jest metodą fotometrii płomieniowej. Miarą odporności jest porównanie ze stężeniem soli dla próbki impregnowanej solą, lecz nieotoczonej asfaltem.

Metoda butelkowa (ang. *rolling bottle method*)

W metodzie butelkowej (prEN 12697-11) 150 g kruszywa frakcji 6,3/8 otoczonych asfaltem o grubości powłoczki 0,1 mm zanurza się w 250 ml zimnej, zdemineralizowanej wody w podłużnej butelce i poddaje się obrotom (60 obr/min) w ustawieniu poziomym (rys. 12). Wizualnie ocenia się zawartość ziaren nieodmytych po 6, 24, 48 i 72 godzinach [50], [53], [54].



Rys.12. Widok urządzenia do metody butelkowej

Fig.12. Rolling bottle method device

Metoda ultradźwięków (ang. *ultrasonic method, Vuorinen and Valtonen*)

Wypolerowane kawałki kruszywa (skał) o wymiarze 20×80 mm otacza się 2 g asfaltu dla uzyskania otoczki równej 0,12 mm. Tak przygotowane próbki poddane są kąpieli wodnej i ultradźwiękom o częstotliwości 35 kHz, gdzie tworzące się mikroskopijne bąbelki powietrza powodują odrywanie się asfaltu [56]. Ocenia się wagowo i wizualnie ilość odmytego asfaltu. Metoda ta jest wciąż doskonałona.

Omawiane metody badawcze mają szereg wad:

- większość metod dotyczy tylko grubych frakcji kruszywa i pozostawiają nieoceniane frakcje drobne,
- wszystkie metody oceniają odmywanie asfaltu w kontekście odsłonięcia powierzchni kruszywa, powodowanego nasycaniem wodą, co nie jest miarą adhezji,

- 5 z 6 procedur polegają na ocenie wizualnej odmycia,
- żadna z metod nie dostarcza wskaźnika, jako efektu wpływu odmycia asfaltu na właściwości strukturalne i jakościowe nawierzchni.

Wszystkie z omówionych metod nie określają dokładnie odporności na oddziaływanie wody na mieszanki mineralno-asfaltowe [18]. Wszystkie mają znaczenie tylko kwalifikujące, ale stosowane równocześnie z innymi badaniami samych mieszanek mogą określać odporność na działanie wody i mrozu ze znacznym prawdopodobieństwem.

Zaletą tych metod jest to, że wszystkie procedury są krótkotrwałe i niewymagające skomplikowanych, drogich narzędzi laboratoryjnych (poza metodą soli wskaźnikowej).

BADANIA ZAGĘSZCZONYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH

Pęcznienie i nasiąkliwość

Stosuje się dwie oceny pęcznienia. Pierwsza opiera się na pomiarze zmian wysokości, druga na pomiarze zmian objętości zagęszczonej próbki po nasyceniu wodą. Nasiąkliwość określa się na podstawie pomiaru zmian masy próbki poddanej nasyceniu wodą. Zarówno badanie pęcznienia jak i nasiąkliwości wykorzystywane jest tylko jako badanie uzupełniające. Wyniki z tych badań mogą posłużyć jedynie do oceny czy środek adhezyjny jest konieczny lub niekonieczny, zaś nie mogą posłużyć do oceny efektywności działania środka adhezyjnego [2], [53].

Wyplukiwanie

Zagęszczone próbki są poddawane nasyceniu wodą destylowaną według jednej z dwóch procedur: nasycanie wodą w temperaturze 49°C przez 6 dni lub w temperaturze pokojowej przez 20 godzin, a następnie 5 godzin w temperaturze 37,5°C. Po pielegnacji są poddawane gwałtownemu wyplukiwaniu wodą pod ciśnieniem [2]. Odporność na oddziaływanie wody ocenia się na podstawie utraty masy próbki.

Mechaniczne badania immersyjne

Mechaniczne badania immersyjne polegają na pomiarze cech mechanicznych zagęszczonych mieszanek mineralno-asfaltowych w wyniku kondycjonowania w środowisku wodnym [2]. Próbki, zagęszczone jak do badania Marshalla, dzielone są na dwie grupy o możliwie zbliżonych gęstościach pozornych. Następnie jedna grupa poddawana jest przedłużonemu nasyceniu wodą w podwyższonej temperaturze. Popularnymi badaniami są badanie Marshalla (AASHTO T245), osiowe ściskanie (AASHTO T165, ASTM D1075) i pośrednie rozciąganie, które zostanie omówione

w dalszej części. Miarą odmycia jest stosunek stabilności Marshalla, czy wytrzymałości na ściskanie po kondycjonowaniu w wodzie do przed kondycjonowaniem. Ten typ badania wykorzystywali badacze w pracach [15], [34], [46 - 47], [57 - 63] i do dziś stosowane jest przez koncern Shell [4].

Metoda Duriez

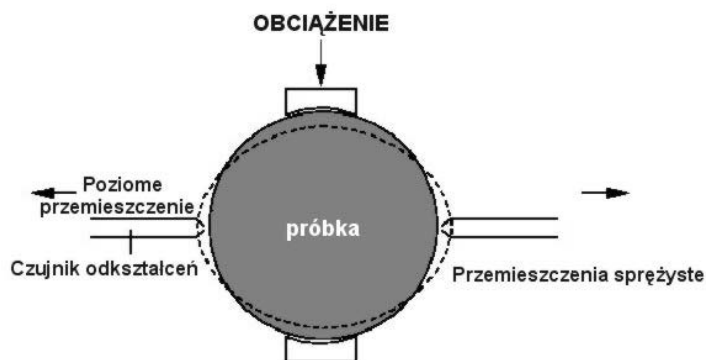
Badanie przeprowadza się na próbkach cylindrycznych $\phi 80$ lub $\phi 120$ mm, statycznie zagęszczonych (12 MPa). Przez 7 dni próbki pozostawia się w kąpieli wodnej w temperaturze 18°C. Miarą adhezji jest stosunek wytrzymałości na ściskanie osiowe (przesuw tłoka wynosi 1 mm/s) próbek poddanych i niepoddanych kąpieli wodnej [64 - 65].

Badania rozciągania pośredniego

Zastosowanie i zasadniczy rozwój badania pośredniego rozciągania na próbkach walcowych, jak do badania Marshalla nastąpił w latach 70-tych i 80-tych. Do twórców metody oceny odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu można zaliczyć grupy kierowane przez Lottmana oraz Roota-Tunniclifa [18]. Istotą tej metody jest badanie wytrzymałości lub modułu (rys. 13), przy pośrednim rozciąganiu próbek niepoddanych i poddanych odpowiednim cyklem kondycjonowania, symulującym długoterminowo warunki panujące na drodze (po raz pierwszy w 1974 roku zastosował Jimenez [66]). Kondycjonowanie składa się z trzech etapów: próżniowego nasycania próbek wodą, 1 cykl zamrożenia-odmrożenia i poddania próbek przedłużonemu oddziaływaniu wody w podwyższonej temperaturze. Próbki zalane wodą o temperaturze 20°C przechowywano w komorze próżniowej o ciśnieniu 200 hPa, przez 25 minut, do osiągnięcia poziomu nasycenia od 55-80%. Następnie próbki owijano w folię, wkładano w torebki foliowe z 10 ml wody i poddano je 1-krotnemu zamrożeniu i odmrożeniu (-18°C przez 16 godz.). Kolejnym etapem było umieszczenie próbek w łaźni wodnej o temperaturze 60°C, zdjęcie folii i przechowywanie przez 24 godz. Po tym próbki doprowadzano do temperatury badania. Oceną odporności jest wskaźnik wytrzymałości (WR) lub/i modułu (WS), czyli stosunek wyniku badania próbki po kondycjonowaniu do wyniku badania bez kondycjonowania. Badanie znormalizowano w normach AASHTO T283, ASTM D4867-88 (bez cyklu zamrażania) oraz wykorzystano w pracach badawczych [12], [15], [25], [34], [37 - 39], [40], [44 - 45], [47 - 48], [52], [54 - 55], [57 - 59], [66 - 82]. Dobre korelacje wyników badań wg omawianej metody z zachowaniem się nawierzchni uzyskano w pracy Aschenbrener'a [54].

Metoda teksańska (ang. *Texas freez-thaw pedestal test – Plancher test*)

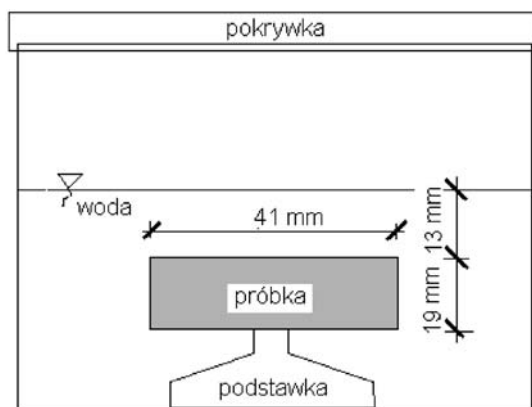
Jest to metoda eksponująca pracę samego połączenia asfaltu i kruszywa, i zmniejszająca wpływ właściwości mechanicznych samej mieszanki, na które wpływa uziarnienie, gęstość i klinowanie się ziaren kruszywa. Kennedy [83] wykazał, że metoda symuluje zmiany w lepkości asfaltu podczas 5 letniej eksploatacji nawierzchni.



Rys.13. Schemat badania modułu sztywności sprężystej przy pośrednim rozciąganiu

Fig.13. Scheme of resilient modulus test

Do badania przygotowuje się specjalnie formowane próbki (średnica 41 mm, wysokość 19 mm) z drobnego kruszywa frakcji 0,5/0,85 mm i asfaltu w ilości odpowiadającej optymalnej zawartości z metody Marshalla dla ocenianej mieszanki mineralno-asfaltowej. Cylindryczne próbki formuje się pod prasą ze stałym naciskiem 28 kN w czasie 20 minut z mieszanki starzonej poprzez dwukrotne rozgrzewanie i schładzanie luźnej mieszanki mineralno-asfaltowej. Przygotowane próbki ustawia się na specjalnej podstawce, jak na rysunku 14 i zanurza się w wodzie destylowanej na 3 dni w temperaturze pokojowej. Następnie poddaje się cyklom zamrażania i odmrażania (-12°C przez 24 godziny, 60°C 24 godziny). Miarą odporności na oddziaływanie wody i mrozu jest liczba cykli zamrażania i odmrażania, którym została poddana próbka do momentu powstania pęknięcia, czy samego zarysowania. Jeśli próbka przeszła mniej niż 10 cykli oznacza to, że jest nieodporna, jeśli zaś więcej niż 20-25 cykli znaczy to, że odporna na działanie wody i mrozu [18], [45], [83].



Rys.14. Schemat oprzyrządowania do badania wg metody teksańskiej

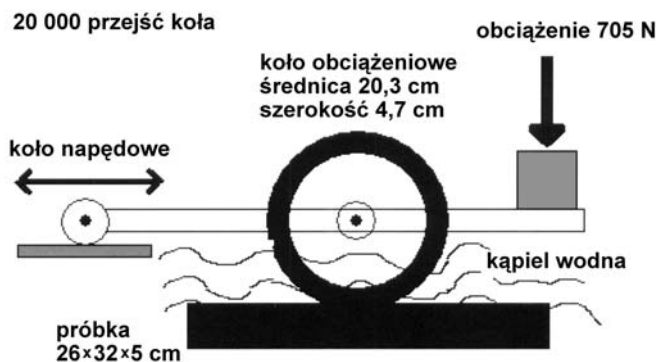
Fig.14. Scheme of Texas freeze-thaw pedestal test

Modyfikacje metody polegały na zmianie czasów zamrażania i odmrażania (zamrażanie przez 15 godzin, odmrażanie przez 45 minut w temperaturze pokojowej i przez 9 godzin w temperaturze 60°C).

Opinie na temat ocen skuteczności identyfikacji podatności mieszanki na wodę i mróz za pomocą tego testu są bardzo podzielone i często sprzeczne. Niemniej procedura teksańska może być stosowana do określenia adhezji kruszywa i asfaltu oraz weryfikacji innych metod badawczych [50].

Metoda koleinomierza z Hamburga (ang. *Hamburg wheel tracking device*)

W badaniu (rys. 15) dwa stalowe koła (obciążenie 705 N, szerokość 47 mm, średnica 204 mm) poruszają się po dwóch zagęszczonych i zanurzonych w wodzie o temperaturze 50°C próbkach (zwykle prostokątnych: szerokość 260 mm, długość 320 mm, grubość 40 mm). Koła poruszają się z prędkością 34 cm/s w środku próbki, co daje 50 przejeżdżnięć na minutę. Test odbywa się do 20 000 przejeżdżnięć koła lub do osiągnięcia 20 mm koleiny. Miarą odmycia jest określenie punktu przegięcia krzywej koleinowania (ang. *Stripping Inflection Point*). Punkt ten odpowiada przecięciu się stycznych do krzywej pełzania i krzywej odmycia, która odpowiada części krzywej, gdzie występuje gwałtowny przyrost koleiny. Metodę wykorzystano w pracach [25], [73], [84], a Aschenbrenner [54] wykazał dobre korelacje ze stanem nawierzchni.



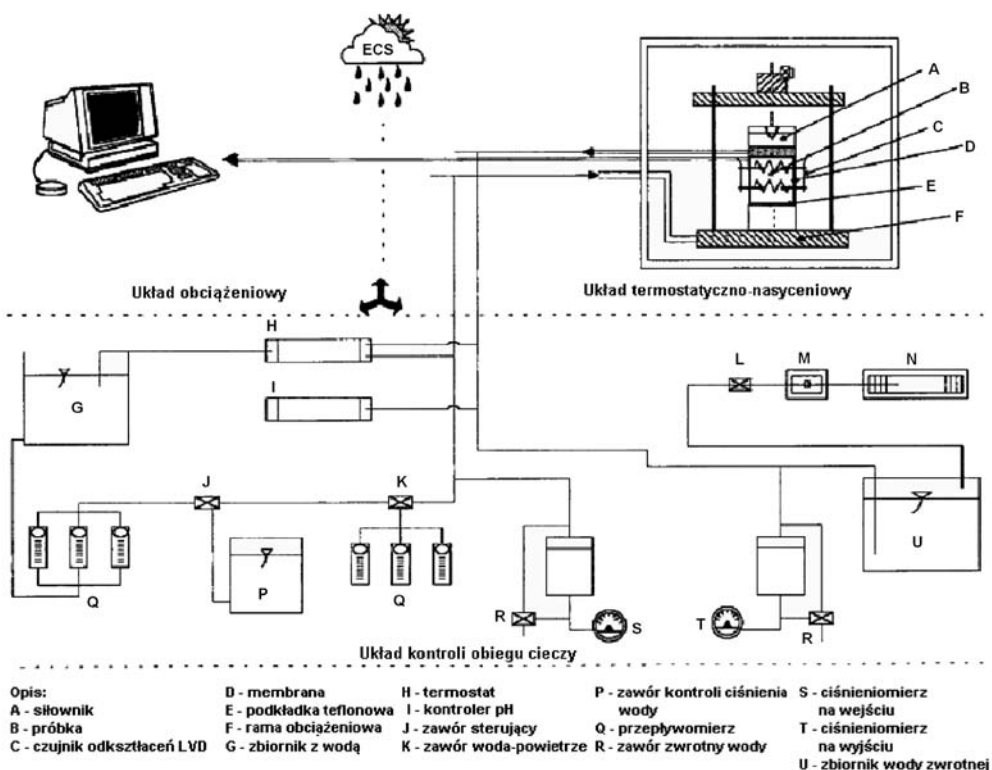
Rys.15. Schemat koleinomierza z Hamburga [85]

Fig.15. Scheme of Hamburg wheel tracking device [85]

Metoda badań na stanowisku ECS (ang. *Environmental Conditioning System*)

Na początku lat 90-tych Terrel i Al-Swailimi [13], [86 - 88] w ramach programu SHRP stworzyli nową procedurę, która dokładniej odzwierciedla prace betonu asfaltowego w nawierzchni przy uwzględnieniu jednoczesnego wpływu wielu czynników na odporność mieszanki na działanie wody i mrozu. W skład aparatury badawczej wchodzi trzy zasadnicze komponenty: układ kontroli obiegu cieczy, układ obciążeniowy i układ termostatyczny (rys. 16).

Układ kontroli obiegu cieczy wykorzystywany jest do nasycania wodą, określania zawartości wolnej przestrzeni, wodoprzepuszczalności zagęszczonych próbek MMA. Wyposażony jest także w system kontroli wskaźnika pH i temperatury wody przepuszczanej przez próbki.



Rys.16. Schemat urządzenia ECS [50]

Fig.16. Diagram of environmental conditioning system (ECS) [50]

Układ obciążeniowy obejmuje zamknięty elektro-pneumatyczny układ regulacji automatycznej z serwomechanizmem i zmodyfikowany aparat trójosiowy, który jednocześnie służy jako prasa obciążeniowa. Układ ten mieści się w kabinie termostatycznej, która jest w stanie utrzymywać stałą temperaturę w zakresie $-20 \div 100^{\circ}\text{C}$, jak i stałą względną wilgotność powietrza do 95%. W badaniu wykorzystuje się cylindryczne próbki o wymiarach $D=101 \text{ mm}$, $H=101 \text{ mm}$ zagęszczano prasą gyratorową lub walcem laboratoryjnym (próbki wycinane) do osiągnięcia zawartości wolnych przestrzeni równej 81%. Przed zagęszczeniem mieszanka mineralno-asfaltowa poddawana jest procesom starzenia krótkoterminowego wg SHRP (4 godz. w temp. 135°C). Próbki badane są w schemacie trójosiowego ściskania.

Procedura ECS zawiera składa się z trzech faz. Pierwsza dotyczy badań próbek suchych tak jak: moduł sztywności sprężystej i przepuszczalności. W drugiej fazie w warunkach próżniowych ($254 \div 508 \text{ mm Hg}$) przez 30 min próbka jest nasycona wodą i określa się wodoprzepuszczalność. W trzeciej nasycone próbki wodą poddaje się termicznym cykлом określając między każdym cyklem moduł sztywności sprężystej.

Cykle termiczne zawierają: 3 gorące cykle w temperaturze 60°C przez 6 godzin i 1 cykl zamrażania w temperaturze -18°C przez 6 godzin. Każdorazowo po każdym cyklu próbka w ciągu 2 godzin doprowadzana jest do temperatury 25°C i wyznaczany jest moduł sztywności sprężystej oraz wodoprzepuszczalność. Podczas gorących cykli w temperaturze 60°C próbka jest poddawana częściowej próżni (254 mm Hg) i ciągłym, powtarzalnym obciążeniom (124 kPa). Podczas cyklu zamrażania próbka nie jest poddawana powtarzalnemu obciążeniu, natomiast jest po wpływie częściowej próżni. Procedura ta bazuje na trzech wielkościach, które według badaczy amerykańskich dość dobrze charakteryzują „wrażliwość” mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu. Są to moduł sztywności sprężystej i wskaźnik zmian po cyklach kondycjonowania, wodoprzepuszczalność i procentowe odmycie asfaltu z kruszywa.

Autorzy programu wielkość graniczną wskaźnika modułu sztywności, określającą odporność na działanie wody i mrozu ustalili na 0,7. Mieszanki o wskaźniku mniejszym niż 0,7 powinny być przeprojektowane i/lub powinien być zastosowany środek adhezyjny.

Porównanie metody ECS z innymi metodami obecnie stosowanymi (między innymi AASHTO T283) pokazuje, że metoda ta charakteryzuje się lepszą powtarzalnością wyników przy mniejszej ilości próbek potrzebnych do badania [13]. Użycie nowoczesnej aparatury badawczej daje dokładne wyniki, które dzięki odpowiedniemu oprogramowaniu komputerowemu są szybko przetwarzane i analizowane [89]. Niestety aparatura ta jest droga. Aschenbrener w pracy [54] stwierdził, że dopiero połączenie ocen odporności mieszanek na działanie wody i mrozu za pomocą ECS i AASHTO T283 daje bardzo dobrą korelację wyników z istniejącym stanem nawierzchni.

Metoda ADAP (ang. *accelerated durability assesment procedure*)

Najmłodsza z omawianych wcześniej metod badawczych – opublikowana została w 2002 roku i dotyczy oceny odporności mieszank mineralno-asfaltowych (do podbudowy) na działanie wody przy uwzględnieniu przyspieszonego starzenia się mieszanki [90], [91]. Wyznacza się moduł sztywności sprężystej w aparacie NAT na wyciętych i zagęszczonych walcem próbkach (8% wolnych przestrzeni). W badaniu stosuje się 6 etapów kondycjonowania próbek, zawierających różne metody starzenia MMA. Po każdym procesie starzenia próbki wykonuje się badanie modułu, a następnie poddaje się próbkę oddziaływaniu wody przez 6 godzinną kąpiel w wodzie w temperaturze 60°C, 16 godzinną kąpiel w wodzie w temperaturze 5°C i 2 godzinną kąpiel w 20°C, po czym wykonuje się badanie modułu. Takim cykłem próbka poddana jest czterokrotnie. Pierwszy etap polega na przechowywaniu próbki w temperaturze 10°C bez przyspieszonego starzenia. Drugi etap polega na przechowywaniu próbki w suszarce z obiegiem powietrza w temperaturze 85°C przez 120 godzin, trzeci etap jest powieleniem drugiego przy jednoczesnym utrzymaniu podwyższonej wilgotności w suszarce. Czwarty etap wykorzystuje niskociśnieniowe utlenianie mieszanki w specjalnym aparacie próżniowym, gdzie przez próbkę wysysa się gorące powietrze o temperaturze 85°C z prędkością 3 l/min w czasie 120 godzin. Piąty etap wykorzystuje urządzenie (rys. 17) z SUPERPAVE do długoterminowego starzenia asfaltów –

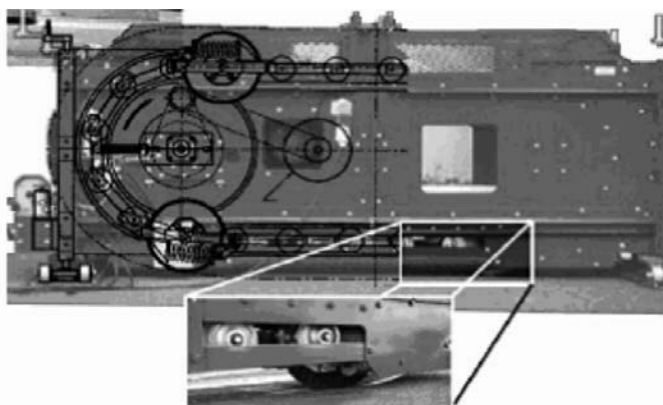


urządzenie PAV (ang. *Pressure Ageing Vessel*). Zagęszczone próbki z mieszanki poddaje się starzeniu w temperaturze 85°C przez 65 godzin i ciśnieniu 2,1 MPa. Szósty etap jest powieleniem poprzedniego z tym, że próbki przed umieszczeniem w urządzeniu PAV przez 30 minut próżniowo nasycą się wodą. Twórcy metody w pracy [91] stwierdzają, że taki sposób kondycjonowania próbek powoduje zbliżone zmiany do tych, jakie obserwują w mieszankach wyciętych z eksploatowanych nawierzchni.

Rys.17. Urządzenie PAV wykorzystywane do starzenia i nasycania próbek wodą [90]
Fig.17. PAV device used for aging and saturation of samples [90]

Przyspieszone badania konstrukcji nawierzchni w pełnej skali (ang. *full-scale accelerated pavement testing*)

W pracy [92] przedstawiono możliwość wykorzystania „symulatora ruchu drogowego” (ang. *Model Mobile Load Simulator – MMLS3*), działającego na rzeczywiste nawierzchnie drogowe oraz modelowe nawierzchnie, jak i na próbki zagęszczane w żyratorze, do przewidywania odporności mieszanek na działanie wody i mrozu. W czasie badania symulatorem (rys. 18) przygotowanych nawierzchni możliwa jest regulacja (kontrola) obciążenia (ciśnienia i nacisku), poziomu nasycenia nawierzchni wodą, ilości przejazdów osi obciążeniowej, temperatury nawierzchni, doboru materiału oraz starzenia się materiału. Następnie wycinano próbki z odcinka nieobciążonego i obciążanego symulatorem, jak do badania AASHTO T283 i wyznaczano wskaźniki modułu i wytrzymałości.

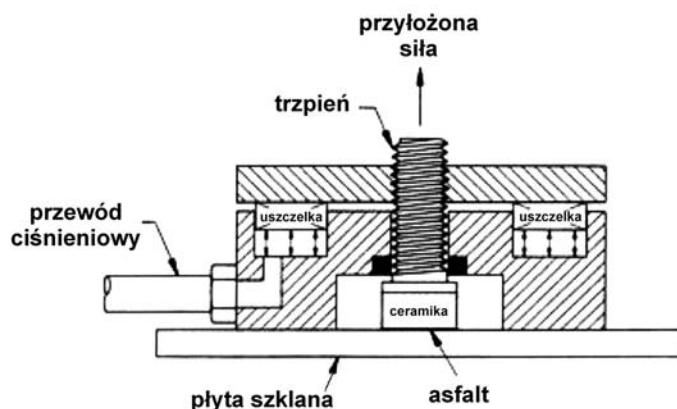


Rys.18. Urządzenie do badania nawierzchni w skali rzeczywistej MMLS3 [92]
Fig.18. Model Mobile Load Simulator device (MMLS3) [92]

BADANIA BEZPOŚREDNIEGO POMIARU ADHEZJI I KOHEZJI ORAZ INNE METODY

Metoda NIST (ang. *pneumatic adhesion test*)

Badacze z NIST (National Institute of Standards and Technology in Canada) stworzyli procedurę badawczą [93 - 94], która pozwala mierzyć zmianę (utrata) sił adhezji oraz kohezji w wiązaniu asfalt-kruszywo wystawionym na działanie wody. Schemat badania przedstawiono na rysunku 19.



Rys.19. Schemat aparatu do pomiaru sił adhezji i kohezji [93]

Fig.19. Scheme of pneumatic adhesion test device [93]

Badaniom poddawana jest próbka asfaltu o grubości 200 m, znajdująca się pomiędzy płytką szklaną a ceramiczną, porowatą płytką zamocowaną na trzpieniu (element silnika tłokowego), do którego jest przykładana siła. Ceramiczna płytkę umożliwia łatwy dostęp wody do całej powierzchni badanej próbki asfaltu. Badanie polega na wywołaniu naprężeń rozciągających w badanej próbce w temperaturze 25°C. Ciśnienie wywierane na próbkę jest stopniowo zwiększane (65,7 kPa/s), aż do momentu zniszczenia próbki, czyli zerwania sił kohezji (połączenie asfalt-asfalt) lub sił adhezji (asfalt-płytkę). Próbki bezpośrednio przed badaniem są poddawane działaniu wody. Czas zanurzenia w wodzie wynosi: 0, 0,5, 1, 2, 4, 8, 12, 24 godziny. Analizowana jest przede wszystkim zmiana niszczącej siły rozciągającej w zależności od czasu zanurzenia w wodzie. Powtarzalność wyników jest dość duża.

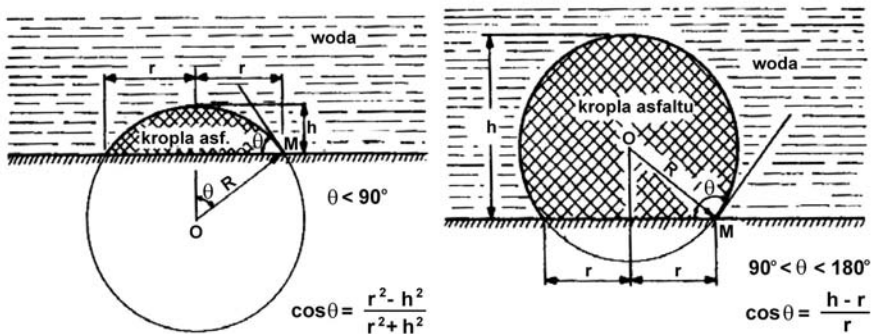
Szklaną płytkę pokrywa asfaltem także Zolotarev [65], [95]. Po 25 minutach zanurzenia w wodzie w temperaturze 85°C określa powierzchnię z nieodmytym asfaltem. Miara jest wskaźnik – iloraz powierzchni pokrytej asfaltem po zanurzeniu w wodzie do powierzchni przed zanurzeniem. Nasuwa się pytanie: czy szkło dobrze odzwierciedla kruszywo mineralne i czy jest reprezentatywne dla różnych kombinacji asfaltu i kruszywa.

Badanie kohezji asfaltu oraz adhezji asfaltu i kruszywa

Autor metody (Stefańczyk) wykorzystał do badań asfaltu aparat skrzynkowy do bezpośredniego ścinania gruntu [1], [6], [62]. Pomijając docisk pionowy wyznaczał naprężenia ścinające, które odpowiadały bezpośrednio kohezji (adhezji) lepiszcza. Próbkę asfaltu rozproszadzał pomiędzy dwie płytki mineralne, wycięte i oszlifowane o wymiarach 60×60×10 mm. Zmniejszając grubość błonki asfaltu, jak i rodzaj minerału (granit, wapień) wykazał, że spadek kohezji na nieaktywnej powierzchni minerału (granit) jest wynikiem braku wzajemnego oddziaływania powierzchni materiału mineralnego z częściami asfalteno-żywicznymi asfaltów [1]. Natomiast Judycki za pomocą tej metody wykazał samoregenerację właściwości adhezyjnych lepiszcza po zniszczeniu pierwotnych wiązań pomiędzy asfaltem i kruszywem [96].

Badanie kąta zwilżenia

Metoda polega na zbadaniu zdolności zwilżenia kruszywa przez asfalt (charakteryzowana przez kąt zwilżenia) z lub bez dodatku środków adhezyjnych. Badanie polega na upuszczeniu kropli asfaltu na gładką płytkę [97]. Następnie całość jest zanurzana w wodzie destylowanej w temperaturze 70°C na 20-30 minut. Kształt kropli jest wyświetlany przy pomocy specjalnego projektora na ekranie. Wielkość kąta zwilżenia obliczana jest na podstawie wielkości pomierzonych bezpośrednio z ekranu. Potrzebne wielkości oraz równania do obliczenia cosinusa kąta θ przedstawia rysunek 20.



Rys.20. Sposób obliczenia kąta zwilżenia [97]

Fig.20. Method of wetting angle calculation [97]

Badanie kruszywa na obecność cząstek pylastych

Zapylenie kruszywa, w szczególności cząstkami ilastymi i gliniastymi wpływa na zmniejszenie odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu [25]. Istnieją w zasadzie trzy metody laboratoryjne pozwalające określić zawartość

tych cząstek w kruszywie: wskaźnik piaskowy, wskaźnik plastyczności, wskaźnik błękitu metylowego [37], [85], [98]. Z przeprowadzonych badań wynika, że wskaźnik błękitu metylowego lepiej niż dwie pozostałe metody wskazuje obecność szkodliwych cząstek pylistych, które mogą indukować odmywanie asfaltu z kruszywa. Dodatkowo wynik badania wskaźnika metylowego może być wykorzystany do oceny zmieniającej się w czasie aktywności powierzchniowej kruszywa (dni od kruszenia kruszywa w kamieniołomie do badania [11]), która dobrze koreluje z odpornością mieszanki na działanie wody i mrozu. Harders w pracy [85] wykazał, że obniżenie aktywności powierzchniowej kruszywa przez około 120-dniowe składowanie poprawia odporność na koleinowanie w koleinomierzu z Hamburga.

Badanie adsorpcji asfaltu (ang. *net adsorption test*)

Badanie powstało w czasie programu badawczego SHRP [8], [87] i jest wykorzystywane w metodzie SUPERPAVE [99], jako klasyfikacyjna procedura selekcji asfaltu i kruszywa, tak jak i oceny efektywności środków adhezyjnych. Metoda opiera się na pomiarze fundamentalnych fizyko-chemicznych zależności (adsorpcję izotermiczną) ilości substancji zaadsorbowanej z roztworu (asfalt) do adsorbentu (kruszywa). Dokonuje się tego przez pomiar zawartości asfaltu rozpuszczonego w toluenie, który jest adsorbowany do powierzchni kruszywa, a następnie przez dodatek odpowiedniej ilości wody desorbowany (zmyty). Jeśli więcej niż 90% asfaltu pozostało w kruszywie, to uważa się, że asfalt i kruszywo są zgodne. Uważa się, że jest brak zgodności, gdy pozostałego w kruszywie asfaltu jest mniej niż 70%, natomiast zgodność jest wątpliwa w przedziale 70 ÷ 90%. Metoda jest skutecznym narzędziem stosowanym także w Europie [100].



Rys.21. Schemat badania adsorpcji asfaltu (NAT)

Fig.21. Scheme of bitumen adsorption test using Net Adsorption Test (NAT) method

KRYTERIA ODPORNOŚCI PRZY POŚREDNIM ROZCIĄGANIU I POZOSTAŁYCH BADANIACH

Najczęściej stosowane kryteria do oceny odporności mieszanek mineralno-asfaltowych to wskaźniki wytrzymałości WR na ściskanie, rozciąganie lub też wskaźniki modułu sztywności sprężystej WS. W tablicy 2 zestawiono minimalne wskaźniki WS i WR (kryteria), określające odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody lub łącznie wody i mrozu przy zastosowaniu różnych metod badawczych.

Tablica 2. Kryteria odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu

Table 2. Criteria for water and frost resistance

Lp.	Miejsce stosowania	Kryterium	Metoda		Publikacja
			Sposób badania	Norma	
1.	Alabama	WR min 70% sugerowane WR min 80%	Rozciąganie pośrednie	AASHTO T283	NCAT Report 92-1 Kandhal [16]
2.	Colorado Department of Transportation (CDOT)	WR min 80% przy projekcie MMA	Rozciąganie pośrednie	AASHTO T283	AAPT, 64, '95 As- chenbrener, McGennis, Terrel [54]
3.	Florida Department of Transportation	WR min 70-80%	Rozciąganie pośrednie	AASHTO T283	AAPT, 67 '98 Choubane, Page, [21]
4.	Superpave	WR min 80%	Rozciąganie pośrednie	AASHTO T283	FHWA-SA-95-003
5.	Colorado Department of Transportation	WR min 80% WS min 70%	Rozciąganie pośrednie	AASHTO T283 ECS-M _R	AAPT, 64, '95 Aschenbrener, McGennis, Terrel [54]
6.	Oregon State University	sugerowane WS min 90%	Rozciąganie pośrednie	ECS-M _R	AAPT, 62, '93 Terrel, Scholz, [84]
7.	Oregon State University	WS min 70%	Rozciąganie pośrednie	ECS-M _R	AAPT, 61, '92 Al-Swailmi, Terrel [13]
8.	SHRP	WS min 70%	Rozciąganie pośrednie	ECS-M _R	AAPT, 64, '95 Aschenbrener, McGennis, Terrel [54]
9.	University of Texas at El Paso	WS min 70%	Rozciąganie pośrednie	ECS-M _R	AAPT, 67, '98 Tandon, Alam [101]

Lp.	Miejsce stosowania	Kryterium	Metoda		Publikacja
			Sposób badania	Norma	
10.	Wielka Brytania	WS min 80%	Rozciąganie pośrednie	HAPAS	BBA, '00 Guidelines Document [102]
11.	Research and Develop Department of Thiokol/Carstab Corporation	WR min 70%	Rozciąganie pośrednie	Lottman test	AAPT, 51, '82 Dalter, Gilmore [57]
12.	Virginia	WR min 70%	Rozciąganie pośrednie	Lottman test	AAPT, 51, '82 Maupin [103]
13.	Szwecja	WR min 70%*)	Rozciąganie pośrednie	prEN 12697-12	ISAP '02, Ulmgren [81]
14.	Kanada	WM**) min 75% WR min 80% WR min 80%	Marshall Rozciąganie pośrednie	MTO LS-283 ASTM D4867 AASHTO T283	TAC ATC '97, Emery, Seddik [15]
15.	Australia	WR min 80%	Rozciąganie pośrednie	AASHTO T283	AAPA'00, NAS, [104]
16.	USA, świat	WM**) min 70%	Marshall	AASHTO T245	AAPT, 51, '82 Tunnicliff, Root [53]
17.	USA, świat	WR _{sc} (40-85%)	Proste ściskanie	T165, ASTM D1075	AAPT, 51, '82 Tunnicliff, Root [56]
18.	Anglia	WS (70-80%)	Rozciąganie pośrednie	TRL Test – LINK protocol	Paper, '02 [91]
19.	Finlandia	WR min R<4,8 MPa	Rozciąganie pośrednie	PANK 4301 PANK 4302	Kielce '98, Zawadzki [105], Iwański [59]
20.	Polska (Unia Europejska)	WR (brak danych)	Rozciąganie pośrednie	prEN 12697-12	EN-PN
<p>Oznaczenia:</p> <p>*) szwedzka administracja drogowa różnicuje kryterium w zależności od rodzaju warstwy i pochodzenia próbek: z laboratorium i z drogi,</p> <p>**) wskaźnik Marshalla.</p> <p>WR – wskaźnik wytrzymałości, iloraz wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po kondycjonowaniu i wytrzymałości na pośrednie rozciąganie bez kondycjonowania,</p> <p>WS – wskaźnik modułu, iloraz modułu sztywności sprężystej po kondycjonowaniu i modułu sztywności sprężystej bez kondycjonowania,</p> <p>WM – wskaźnik stabilności, iloraz stabilności wg Marshalla po kondycjonowaniu i stabilności wg Marshalla bez kondycjonowania,</p> <p>WR_{sc} – wskaźnik wytrzymałości na ściskanie, iloraz wytrzymałości na ściskanie osiowe po kondycjonowaniu i wytrzymałości ściskanie osiowe bez kondycjonowania.</p>					

Z tablicy 2 wynika, że nie ma dokładnie jednego wspólnego kryterium odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu. Pomimo stosowania w większości przypadków metody AASHTO T283 wymaganie jest zmienne. Kryterium minimalnego wskaźnika wytrzymałości WR waha się $70 \div 80\%$, a minimalnego wskaźnika modułu sztywności $70 \div 90\%$. Częściej występuje kryterium wskaźnika wytrzymałości WR nie mniejszego od 80% . Oznacza to, że dopuszczalny spadek wytrzymałości na pośrednie rozciąganie mieszanki po cyklach, symulujących w laboratorium długotrwałe oddziaływanie wody i mrozu nie może wynosić więcej niż 20% w stosunku do wytrzymałości na pośrednie rozciąganie mieszanki niepoddanej cyklem symulującym.

PRACE NAD ODPORNOŚCIĄ MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH NA DZIAŁANIE WODY I MROZU W POLSCE

W Polsce badania nad adhezją asfaltu i kruszywa, wpływem środków adhezyjnych na adhezję i odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu rozpoczął Dziedziuk [106]. Począwszy od końca lat 60 tych prowadzi Stefańczyk [1], [6], [61], [62], [97], także Alama i Szczepaniak [10], [67 - 68], Zawadzki [63], [105], Iwański [34], [58 - 60] oraz Judycki i Jaskuła [75], [77 - 78], [107 - 108].

10. PODSUMOWANIE

W artykule wskazano, jak wiele czynników i ich kombinacji wpływa na trwałość połączenia asfaltu i kruszywa w mieszance mineralno-asfaltowej poddanej oddziaływaniu wody i mrozu oraz jak złożone jest zjawisko odmycia asfaltu z powierzchni kruszywa. Istnieje wiele metod badawczych za pomocą, których z pewnymi ograniczeniami można identyfikować i zapobiegać zjawisku niszczącego oddziaływania wody i mrozu w mieszankach mineralno-asfaltowych. Zdaniem autora stosowanie metody, gdzie oceniane są zmiany właściwości mechanicznych po oddziaływaniu wody i mrozu kompletnej mieszanki jest rozwiązaniem właściwym. A metody oparte na ocenie, często wizualnej, wybranej frakcji kruszywa i asfaltu poddanej oddziaływaniu wody i mrozu należy stosować uzupełniająco. Jednocześnie badania odporności mieszanek na oddziaływanie wody i mrozu należy wprowadzić jako badania obligatoryjne na etapie doboru materiałów podczas projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Stefańczyk B.*: Materiały Drogowe, 139-172, Szczecin 1989
- [2] *Majidzadeh K., Brovold F.*: Effect of Water on Bitumen - Aggregate Mixtures. Highway Research Board, Washington 1968

-
- [3] *Adamson A.W.*: Chemia fizyczna powierzchni. PWN, Warszawa 1963
- [4] *Whiteoak D.*: The Shell Bitumen Handbook. First edition, 1991
- [5] *Graf S.E.*: Factors Affecting Moisture Susceptibility of Asphalt Concrete Mixes. AAPT, **55**, 175-210, 1986
- [6] *Stefańczyk B.*: Strukturalno-mechaniczne właściwości asfaltów w szerokim zakresie temperatur. Szczecin 1989, 157-165
- [7] *Anderson D.A., Petersen J.C., Christensen D.W.*: Variations in Asphalt Cements and Their Effects on Performance of Asphalt Concrete Mixtures. AAPT, **55**, 250-268, 1986
- [8] *Curtis Ch.W., Ensley K., Epps J.*: Fundamental Properties of Asphalt-Aggregate Interactions Including Adhesion and Absorption. SHRP-A- 341, 605, 1994
- [9] *Huang S.C., Branthaver J.F., Robertson R.E.*: The Influence of Aggregate on Moisture Susceptibility in Terms of Asphalt - Aggregate Interactions. 6th International RILEM Symposium, Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials 2003, 177-184
- [10] *Szczepaniak Z.*: Środki adhezyjne do nawierzchni bitumicznych. Materiały doradczo-szkoleniowe na kurs „Środki adhezyjne i modyfikatory asfaltu”, IBDiM, Warszawa 1996
- [11] Asphalt Institute. Cause and Prevention of Stripping in Asphalt Pavements, 1987
- [12] *Coplantz J., Newcomb D.*: Water Sensitivity Test Methods for Asphalt Concrete Mixtures: A Laboratory Comparison, TRR 1171, 1988
- [13] *Al-Swailmi S., and R.L. Terrel.*: Evaluation of Water Damage of Asphalt Concrete Mixtures Using the Environmental Conditioning System (ECS). AAPT 1992, **61**, 405-446
- [14] Austroads-AAPA. Air Voids in Asphalt, 1999
- [15] *Emery J., Seddik H.*: Moisture Damage of Asphalt Pavements and Antistripping Additives: Causes, Identification, Testing and Mitigation. Transportation Association of Canada, 1997
- [16] *Kandhal P.S.*: Moisture Susceptibility of HMA Mixes: Identification of Problem and Recommended Solutions, National Asphalt Pavement Association, QIP 119, 1992
- [17] *Santucci L.E., Allen D.D., Coats R.L.*: The Effects of Moisture and Compaction on the Quality of Asphalt Pavements. AAPT, **54**, 168-208, 1985
- [18] *Terrel R.L., Shute J.W.*: Summary Report on Water Sensitivity. SHRP-A/IR-89-003, Washington 1989
- [19] *Terrel R.L., Swailmi S.Al.*: Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: Test Selection. SHRP-A-403, 183 pages, 1994
- [20] *Terrel R.L., Al-Swailmi S.*: The Role of Pessim Voids Concept in Understanding Moisture Damage to Asphalt Concrete Mixtures, Technical Papers, www.wilderconstruction.com/matcon
- [21] *Choubane B., Page G., Musselman J.*: Investigation of Water Permeability of Coarse Graded Superpave Pavements. AAPT, **67**, 254-276, 1998
- [22] *Nielsen C.*: Selection of Pavement Maintenance by use of Accelerated Load Testing. ISAP, 2: 3-1 - 2: 3-2, Kopenhaga 2002
- [23] *Raaberg J., Rosenberg J.*: Examination of Rutting and Weathering Characteristics of Various Danish Road Classes. 2nd Eurasphalt&Eurobitume Congress Barcelona 2000, **1**, 689-696

- [24] *Raaberg J., Rosenberg J.*: Examination of Rutting and Weathering Characteristics of Various Danish Road Classes. Danish Road Institute, Report 111, 2001
- [25] *Kandhal P.S., Lynn C.Y., Parker F.*: Tests for Plastic Fines in Aggregates Related to Stripping in Asphalt Paving Mixtures. AAPT, **67**, 233-254, 1998
- [26] *Kandhal P.S., Rickards I.J.*: Premature Failure of Asphalt Overlays from Stripping: Case Histories. NCAT Report No 01-01, 2001
- [27] *Schmidt R.J., Graf P.E.*: The Effect of Water on the Resilient Modulus of Asphalt Treated Mixes. AAPT, **41**, 118-162, 1971
- [28] *Fromm H.J.*: The Mechanisms of Asphalt Stripping from Aggregate Surface. AAPT, **43**, 191-223, 1973
- [29] *Tarrer A.R., Wagh V.*: The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding. SHRP-A/UIR-91-507, 23
- [30] *Kandhal P.S., Lubold C.W., Roberts. F.L.*: Water Damage to Asphalt Overlays: Case Histories. AAPT, **58**, 40-77, 1989
- [31] Guericke. ARBIT presentation, 6th RILEM Symposium PTEBM'03, Zurich 2003
- [32] *Scott J.A.N.*: Adhesion and Disbonding Mechanisms of Asphalt Used in Highway Construction and Maintenance. AAPT, **47**, 19-47, 1978
- [33] *Puzina Uskas V.P.*: Symposium on Antistripping Additives in Paving Mixtures. AAPT, **51**, 263-292, 1982
- [34] *Iwański M.*: Wpływ kruszywa kwarcytowego na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na oddziaływanie wody i mrozu. Drogownictwo, 35-43, nr 2/2002
- [35] *Johansson L.S.*: Influence of hydrated lime on bitumen hardening. Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, TRITA-IP FR 95-8, 1995
- [36] *Anderson D.A., Dukatz E.L., Claine Petersen J.*: The Effect of Antistrip Additives on the Properties of Asphalt Cement. AAPT, **51**, 298-317, 1982
- [37] *Tunncliff D.G., Root R.E.*: Testing Asphalt Concrete for Effectiveness of Antistripping Additives. AAPT, **52**, 535-559, 1983
- [38] *Hunter E.R., Ksaibati K.*: Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Mixes, Report. University of Wyoming, 2002
- [39] *Kennedy T.W., Ping W.V.*: An Evaluation of Effectiveness of Antistripping Additives in Protecting Asphalt Mixtures from Moisture Damage. AAPT, **60**, 231-263, 1991
- [40] *Little D., Epps J.*: Hydrated Lime - More Than Just a Filler, www.lime.org/HydratedLime.pdf.
- [41] *Little D., Epps J.*: The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt. National Lime Association, 2001
- [42] *Schellenberg K., Eulitz H.*: Verbesserung von Asphalteeigenschaften durch Einsatz von Kalkhydrat. Bitumen, nr 1/99
- [43] *Swanson M.*: Lime: Anti - Strip Additive. Astec, Technical Paper T-131, 1997
- [44] *Tunncliff D.*: Performance of Antistripping Additives, AAPT, **66**, 344-368, 1997

-
- [45] *Kennedy T.W., Turnham N., Epps J., Smoot C., Young F.M., Button J.W., Zeigler C.D.*: Evaluation of Methods for Field Applications of Lime to Asphalt Concrete Mixtures. *AAPR*, **52**, 508-534, 1983
- [46] *King G.N., Muncy H.W., Prudhomme J.B.*: Polymer Modification: Binder's Effect on Mix Properties. *AAPT*, **55**, 519-540, 1986
- [47] *Dunning R.L., Schulz G.O., Gawron W.F.*: Control of Stripping with Polymer Treatment of Aggregates. *AAPT*, **62**, 223-245, 1993
- [48] *Sybilski D., Mechowski T.*: Evaluation of durability of bituminous mixtures. Euroasphalt&Eurobitume Congress, 4-8, Strasbourg 1996
- [49] *Judycki J., Jaskula P.*: Wpływ modyfikacji asfaltu na odporność betonu asfaltowego na oddziaływanie czynników środowiskowych. VI Międzynarodowa Konferencja Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe, Kielce 2000, 99-108
- [50] *Airey G., Choi Y.K.*: State of the Art Report on Moisture Sensitivity Test Methods for Bituminous Pavement Materials. *Road Materials and Pavement Design*, 355-372, nr 4/2002
- [51] *Kiggundu B.*: Stripping in HMA Mixtures: State - of - the Art and Critical Review of Test Methods. September 1988
- [52] *Selim A.A.*: The Merits of Using Liquid Antistripping Agents to Eliminate the Stripping Potential of the Sioux Quartzite. IV International Conference on Civil Engineering, 192-203, 1997
- [53] *Tunnicliff D.G., Root R.E.*: Antistripping Additives in Asphalt Concrete - State - of - the - Art 1981. *AAPT*, **51**, 265-289, 1982
- [54] *Aschenbrener T., McGennis R.B., Terrel R.L.*: Comparison of Several Moisture Susceptibility Tests to Pavements of Known Field Performance. *AAPT*, **64**, 163-209, 1995
- [55] *Parker F. Jr.*: Evaluation of Tests To Assess Stripping Potential of Asphalt Concrete Mixtures. TRR 1171, National Research Council, Washington, D.C., 1988
- [56] *Vuorinen M.J., Valtonen J.P.*: A New Ultrasonic Method for Measuring The Resistance to Stripping. Eurobitume Workshop 99, paper 023, 4, Luxemburg,
- [57] *Dalter R.S., Gilmore D.W.*: A Comparison of Effects of Water on Bonding Strengths of Compacted Mixtures of Treated Versus Untreated Asphalt. *AAPT*, **51**, 317-326, 1982
- [58] *Iwański M.*: Wpływ rodzaju asfaltu na trwałość betonu asfaltowego, II Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym”, 347-355, Poznań 2001
- [59] *Iwański M.*: Wpływ wapna hydratyzowanego na właściwości fizyko-mechaniczne betonu asfaltowego, IX Międzynarodowa Konferencja Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe, 77-84, Kielce 2003
- [60] *Iwański M.*: Zależność między ilością środka adhezyjnego a właściwościami fizykomechanicznymi betonu asfaltowego. VII Międzynarodowa Konferencja Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe, 65-74, Kielce 2001
- [61] *Stefańczyk B., Rodzoch M.*: Wpływ preparatu powierzchniowo-czynnego Kaminoks D na wybrane właściwości mechaniczne betonu asfaltowego. Krynica 1991, 62-66

- [62] *Stefańczyk B.*: Influence of Surface Active Additives on the Properties of Asphalt and Mineral-Asphalt Mixtures. 1992, 354-373
- [63] *Zawadzki J.*: Opracowanie metodyki badania odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na wpływ czynników niszczących: wody i mrozu. Sprawozdanie z realizacji tematu TN-187 dla GDDP, 1999
- [64] *Corte J.F., Serfass J.P.*: The French Approach to Asphalt Mixtures Design: A Performance-Related System of Specifications. AAPT, **69**, 794-834, 2000
- [65] *Zolotarev V.A., Pissanko A.A.*: Adhesive Activity of Bitumen with Adhesion Agent and its Influence on Asphalt Concrete Water - Resistance. 6th Int. RILEM Symposium, Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, 184-190, 2003
- [66] *Parker F. Jr, Gharaybeh F.A.*: Evaluation of Indirect Tensile Tests for Assessing Stripping of Alabama Asphalt Concrete Mixtures. Transportation Research Record 1115, National Research Council, Washington, D.C., 1987
- [67] *Alama K., Szczepaniak Z.*: Krajowe środki adhezyjne do asfaltu. Dikamin R. Prace IBDiM, nr 1-2/1989
- [68] *Alama K., Szczepaniak Z.*: Krajowe środki adhezyjne do asfaltu. Kaminoks D. Prace IBDiM, nr 4/1990
- [69] *Gharaybeh F.A.*: Evaluation of Indirect Tensile Tests for Assessing Stripping of Alabama Asphalt Concrete Mixtures. TRR 1987
- [70] *Gilmore D.W., Lottman R.S., Scherocman J.A.*: Use of Indirect Tension Measurements to Examine the Effect of Additives on Asphalt Concrete Durability. AAPT, **53**, 495-524, 1984
- [71] *Hobeda P.*: Testing the durability of asphalt mixes for severe winter conditions. 2nd Euro-asphalt&Eurobitume Congress Barcelona 2000, **1**, 1029-1037
- [72] *Isacsson U.*: Portland Cement as Anti-Stripping Additive in Bituminous Road Bases. Royal Institute of Technology, Sweden
- [73] *Izzo R.P., Tahmoressi M.*: Use of the Hamburg Wheel - Tracking Device for Evaluating Moisture Susceptibility of Hot - Mix Asphalt. TRR 1681, paper no 99-0955, 76-85
- [74] *Judycki J., Jaskuła P.*: Badania oddziaływania wody i mrozu na betony asfaltowe o zwiększonej odporności na deformacje trwałe. Drogownictwo, 367-371, nr 12/1999
- [75] *Judycki J., Jaskuła P.*: Badania odporności betonów asfaltowego na działanie wody i mrozu. Drogownictwo 12, 374-378, Warszawa 1997
- [76] *Judycki J., Jaskuła P.*: Badania odporności betonu asfaltowego zawierającego wapno hydratyzowane na działanie wody i mrozu. V Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe”, 111-118, Kielce 11-12 maja 1999
- [77] *Judycki J., Jaskuła P.*: Relationship between physical properties of bitumen binders and performance properties of asphalt mixes. Eurobitume Workshop, 1-4, Luxemburg 1999
- [78] *Judycki J., Jaskuła P.*: Wpływ rodzaju asfaltu na odporność betonu asfaltowego na działanie wody i mrozu. IV Międzynarodowa Konferencja, 65-74, Kielce 1998
- [79] *Maupin G.W.*: Evaluation of Stripping in Virginia's Pavements. TRR 1681

- [80] *Silva H.D., Pais J.C., Pereira P.*: Comparison between Tensile, Stiffness and Fatigue Life Tests Results. 6th Int. RILEM Symposium, Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, 205-219
- [81] *Ulmgren N.*: Performance requirements on asphalt mixtures/layers in asphalt contracts. ISAP, 2: 2-2 - 2: 2-3, Kopenhaga 2002
- [82] *Wahhab H.I.A., Hasnain J.*: Study of Asphalt Concrete Mixes Durability Problem in Jeddah, Saudi Arabia, 1984, s. 111-116
- [83] *Kennedy T.W., Roberts F.L., Lee K.W.*: Evaluation of Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures Using the Texas Freeze-Thaw Pedestal Test. AAPT, **51**, 327-342, 1982
- [84] *Terrel R.L., Scholz T., Al-Joaib A., Al-Swailmi S.*: Validation of Binder Properties Used to Predict Water Sensitivity of Asphalt Mixtures. AAPT, **62**, 172-222, 1993
- [85] *Harders O., Noesler I.*: Influence of the surface energy status of aggregates on the performance of asphalt hot mix. ISAP, Kopenhaga 2002
- [86] *Al-Swailmi S., and Terrel R.L.*: Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: Test Selection. Report SHRP-A-403, SHRP, National Research Council, Washington 1994
- [87] *Harrigan T., Leahy R.B., Youtcheff J.S.*: The SUPERPAVE Mix Design System, Manual of Specifications, Test Methods, and Practices. SHRP A-379, 255
- [88] *Terrel R.L., Al-Swailmi S.*: Water Conditioning of Asphalt Concrete Mixes ECS, 2002
- [89] *Allen W.L., Terrel R.L.*: Field Validation of the Environmental Conditioning System. SHRP-A-396, 194
- [90] *Airey G., Choi Y., Collop A.*: Development of an Accelerated Durability Assessment Procedure for High Modulus Base (HMB) Materials. 6th Int. RILEM Symposium, Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, 160-173, 2003
- [91] *Choi Y.K., Collop A.C., Airey G.D.*: Assessment of durability of High Modulus Base (HMB). 6th Int. Conference of Road, Railways, Airfields, 1-8, Lisbona 2002
- [92] *Smith A., Hugo F.*: The Model Mobile Load Simulator as a tool for evaluating asphalt performance under wet conditions. ISAP, 5: 1-3, Kopenhaga 2002
- [93] *Youtcheff J., Aurilio V.*: Moisture Sensitivity of Asphalt Binders: Evaluation and Modeling of the Pneumatic Adhesion Test Results. Canadian Association of Asphalt Technology, 180-200, 1997
- [94] *Youtcheff J., Williams C., Stuart K.*: Moisture Sensitivity Testing of Bitumen Using a Pneumatic Adhesion Test. Eurobitume Workshop 99, paper 135, Luxemburg
- [95] *Zolotarev V.A., Stolyarava L.V.*: Polymer-Bitumen Binder on the Base of Oxidised Bitumen and Thermoplast Elvaloy-AM. VIII Międzynarodowa Konferencja Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie, 183-188, Kielce 2002
- [96] *Judycki J.*: Drogowe asfalty i mieszanki mineralno-asfaltowe modyfikowane elastomerem. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, nr 452, 254, Gdańsk 1991
- [97] *Stefańczyk B.*: Wpływ środków powierzchniowo czynnych na jakość mas bitumicznych. Politechnika Wroclawska, III Sesja Naukowa, 207-212, 1968
- [98] *Nosler I.*: New possibilities for a quantitative test of the adhesion between mineral aggregate and bitumen. 2nd Eurasphalt&Eurobitume Congress, **1**, 1-7, Barcelona 2000

- [99] *Kennedy T.W., Huber G.A., Harrigan E.T., Cominsky R.J., Hughes C.S., Von Quintus K., Moulthrop J.S.*: Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave), SHRP A-410, 170
- [100] *Voskuilen J.L.M., Molenaar J.J.M., Pietersen H.S., Klarenaar W.*: Adsorption and desorption of bitumen/toluene mixtures on mineral aggregates. Eurasphalt&Eurobitume Congress, 4-12, Strasbourg 1996
- [101] *Tandon V., Alam M.*: Significance of Conditioning Parameters Affecting Distinction of Moisture Susceptible Asphalt Concrete Mixtures in the Laboratory. AAPT, **67**, 334-357, 1998
- [102] Guidelines Document for the Assessment and Certification of Thin Surfacing System for Highways, British Board of Agreement, Working Draft, 2000
- [103] *Maupin G.W.*: The use of Antistripping Additives in Virginia. AAPT, **51**, 342-362, 1982
- [104] National Asphalt Specification Edition 1. Australian Asphalt Pavement Association, 2000
- [105] *Zawadzki J., Skierczyński P.*: Ocena przydatności piasku żuźlowego do mieszanek mineralno-asfaltowych. IV Międzynarodowa Konferencja Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie, 183-193, Kielce 1998
- [106] *Dziedziuk J.*: Nowe substancje zwiększające przyczepność lepiszczy bitumicznych do drogowych materiałów kamiennych. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, 1964
- [107] *Judycki J., Jaskuła P.*: Wpływ wapna hydratyzowanego na właściwości betonu asfaltowego. Niepublikowany raport z badań, Gdańsk, wrzesień 1999
- [108] *Jaskuła P., Judycki J.*: Badania ulepszonych asfaltów D70 z Rafinerii Gdańskiej i betonów asfaltowych wykonanych z ich zastosowaniem. V Międzynarodowa Konferencja Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe, 93-100, Kielce 1999

DETERIORATING EFFECTS OF WATER AND FROST ON ASPHALT MIXES – STATE OF THE ART

Abstract

This paper is based on studies of Polish and foreign literature. The influence of significant factors on adhesion and resistance of asphalt mixes to water and frost action is presented. The influence of bitumen properties, type of aggregate, adhesive agents (amines and hydrated lime), air voids content and highway drainage was described. Mechanism and theories of adhesion and mechanisms of damage of bond between bitumen and aggregate were presented. The laboratory testing methods that were used for determining the strength of the bond between bitumen and aggregate and the resistance of asphalt mixes to action of water and frost were reviewed. Moreover, methods used to increase the resistance of asphalt mixes to water and frost were also presented.