



KAROL NOWAKOWSKI

Miejski Zarząd Dróg
w Kielcach
karol.nowakowski@mzd.
kielce.pl

Wpływ dodatku THPP na wybrane właściwości fizyko-mechaniczne mieszanki SMA8

Zwiększająca się świadomość w zakresie zagadnień związanych z ekologią, jak również dążenie do minimalizowania kosztów wytwarzania mieszank mineralno-asfaltowych (MMA), stanowią zasadniczy impuls do poszukiwania dodatków chemicznych powodujących obniżenie kosztów realizacji inwestycji drogowych. W ten trend wpisują się technologie energooszczędne, które umożliwiają wytwarzanie i wbudowywanie mieszank w obniżonej temperaturze [2]. Do takich technologii zalicza się produkcję mieszank mineralno-asfaltowych na ciepło – WMA (*Warm Mix Asphalt*).

Nowoczesne technologie powinny zapewniać odpowiednią trwałość warstw wykonanych z mieszank mineralno-asfaltowych, co uzależnione jest w głównej mierze od prawidłowego zaprojektowania MMA oraz odpowiedniego zagęszczenia układanej warstwy. Szczególnie mieszanki do warstwy ścieralnej są narażone na obciążenie ruchem pojazdów oraz oddziaływania czynników atmosferycznych [5, 6]. Właściwe zagęszczenie przy uzyskaniu wymaganych wartości wolnych przestrzeni uzależnione jest od temperatury wytwarzania i wbudowania MMA [13].

Typowe mieszanki wytwarzane i wbudowywane w technologii na gorąco *Hot Mix Asphalt* (HMA) produkuje się w temperaturze od 160°C do 180°C w zależności od rodzaju lepiszcza, natomiast wbudowanie powinno następować w temperaturze około 140°C. Mieszanki w technologii na ciepło wytwarzane i wbudowywane są w obniżonej temperaturze, tzn. w przedziale od 110°C do 140°C [6, 12, 22].

Wytwarzanie mieszank w technologii WMA możliwe jest między innymi w wyniku zastosowania środków obniżających lepkość tzw. uplastycznaczy asfaltów takich jak chemiczne dodatki powierzchniowo aktywne [11]. Środki tego typu umożliwiają obniżenie temperatury otaczania składników mieszanki mineralno-asfaltowej nawet o 40°C [1, 4]. Mogą decydować o przedziale lepkości lub obniżeniu napięcia powierzchniowego lepiszcza. Uzyskanie tego efektu możliwe jest przez zastosowanie środków powierzchniowo czynnych [11, 14], do których zalicza się związek chemiczny określany skrótem THPP (tetra-hydro-pirymidyn propylu).

Zastosowanie dodatku THPP umożliwia zagęszczanie mieszanki grysowo-mastyksowej SMA w obniżonej temperaturze, przy utrzymaniu zbliżonych pa-

rametrów zagęszczenia i wolnej przestrzeni, jaką uzyskuje się w tradycyjnej technologii wbudowania mieszank na gorąco (*Hot Mix Asphalt*).

Program badań

W celu określenia wpływu dodatku THPP na właściwości fizyczne i mechaniczne mieszanki mastyksowo-grysowej (SMA) opracowano program badań. Zakres prac badawczych podzielono na dwa etapy.

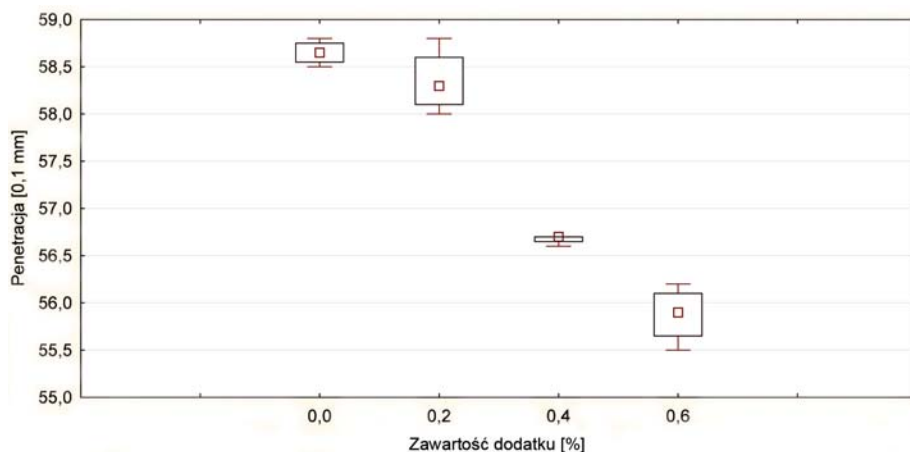
W pierwszym etapie ustalono zakres dozowania THPP do lepiszcza w przedziale od 0% do 0,6% [wag] w stosunku do asfaltu – ze zwiększaniem ilości o 0,2%. Następnie wykonano oznaczenie wpływu dodatku środka na wybrane parametry asfaltu modyfikowanego PMB 45/80-55, tj: penetracja w temperaturze 25°C, temperatura mięknięcia, łamliwość, nawrót sprężysty, adhezja i lepkość dynamiczna.

W drugim etapie oznaczono wpływ dodatku ocenianego środka na właściwości fizyko-mechaniczne mieszanki SMA, do których zaliczyć można zawartość wolnych przestrzeni, wytrzymałość na rozciąganie pośrednie oraz wodoodporność SMA.

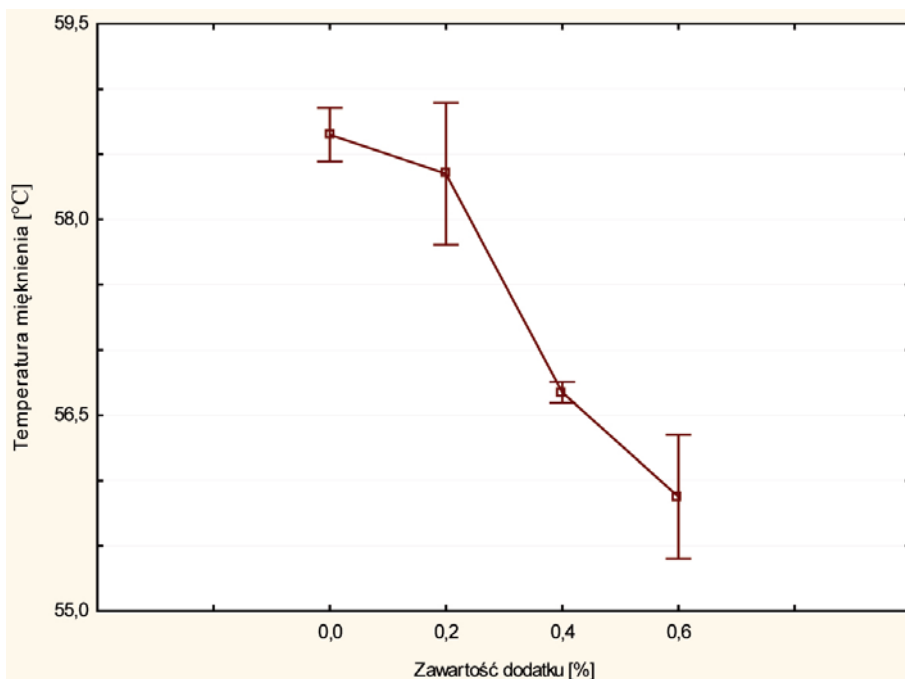
Wpływ dodatku THPP na wybrane właściwości lepiszcza

Wpływ dodatku THPP na konsystencję asfaltu modyfikowanego PMB 45/80-55 przedstawiono na rysunku 1.

W celu oceny i przedstawienia wyników badanych parametrów zastosowano szacowanie metodą estymacji para-



Rys. 1. Wpływ dodatku THPP na penetrację asfaltu PMB 45/80-55

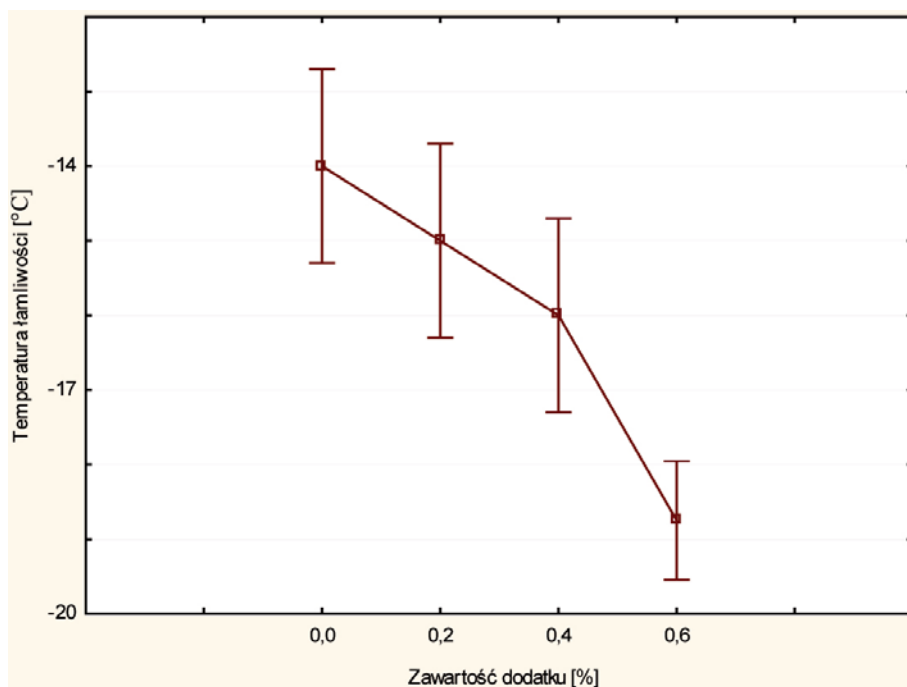


Rys. 2. Wpływ dodatku THPP na temperaturę mięknięcia asfaltu PMB 45/80-55

metrycznej. Znajdujące się na wykresie obszary prostokątne, tzw. pudełka przedstawiają ocenę przedziału estymacji, natomiast wewnętrzny obszar symbolizuje medianę badanego przedziału. Obustronne wypustki, tzw. wąsy, informują o 95% przedziale ufności.

Na podstawie badań penetracji asfaltu wykonano analizę wyników z uwzględnieniem rozszerzonej niepewności pomiaru, która nie przekraczała 5%. Stwierdzono, że każdorazowe zwiększenie zawartości dodatku w lepiszczu modyfikowanym PMB 45/0-55 powoduje wzrost parametru w ba-

przedziale spada wraz ze wzrostem zawartości dodatku. W przedziale od 0% do 0,2% wpływ dodatku jest niewielki i wynosi jedynie 1°C. Najniższą stwierdzoną wartość badanego parametru stwierdzono przy zawartości 0,6% dodatku i jest niższa o około 3°C od temperatury mięknięcia lepiszcza bez dodatku. Zastosowanie dodatku THPP nie powodowało generalnie istotnych zmian temperatury mięknięcia w przypadku badanego lepiszcza, które nadal spełniało wymagania stawiane asfaltowi PMB 45/80-55.



Rys. 3. Wpływ dodatku THPP na temperaturę łamliwości asfaltu PMB 45/80-55

danym przedziale. Maksymalną zmianę parametru uzyskano przy zawartości dodatku 0,6%, natomiast w przedziale od 0% do 0,2% zmiana penetracji była niewielka i w zasadzie nie przekraczała wartości błędu pomiarowego. Widoczny wzrost wystąpił dopiero w przedziale od 0,4% do 0,6% i maksymalnie zwiększył się o 10 jednostek. Zmiana ocenianej wartości nie prowadziła do zmiany rodzaju asfaltu.

Kolejnym badanym parametrem był wpływ dodatku THPP na temperaturę mięknięcia. Rysunek 2 przedstawia oddziaływanie dodatku na konsystencję asfaltu w podwyższonej temperaturze.

Uzyskane wyniki badań zaprezentowano na wykresie w postaci kropki przedstawiającej średnią badanego przedziału, natomiast zaznaczone na wykresach tzw. wąsy przedstawiają odchylenie standardowe.

Wyniki badań wykazały, że temperatura mięknięcia asfaltu w badanym

Temperatura łamliwości

Temperatura łamliwości asfaltu jest istotnym parametrem odnoszącym się do odporności asfaltu na pękanie w niskich temperaturach. Temperatura łamliwości informuje o momencie, w którym asfalt staje się kruchy oraz o zakresie temperatury, który jeszcze nie ma negatywnego wpływu na parametry mieszanek mineralno-asfaltowych. Wpływ dodatku THPP na asfalt modyfikowany PMB 45/80-55 przedstawiony został na rysunku nr 3.

Średnia temperatura łamliwości badanego lepiszcza z dodatkiem THPP w przedziale od 0,2% do 0,4% uległa obniżeniu o odpowiednio 1°C do 2°C w stosunku do temperatury łamliwości lepiszcza bez dodatku. Zauważalny spadek zaobserwowano przy zawartości dodatku 0,6% i wyniósł on -4°C w stosunku do lepiszcza bez dodatku. Wraz ze wzrostem dodatku THPP nastąpiło

obniżenie średniej wartości temperatury łamliwości. Spadek temperatury łamliwości badanego lepiszcza z dodatkiem THPP może powodować wzrost odporności na spękania niskotemperaturowe mieszanki mastyksowo-grysowej.

Indeks penetracji

Jednym z podstawowych parametrów określających właściwości reologiczne asfaltu jest indeks penetracji, za pomocą którego określono wpływ dodatku THPP na zakres sta-

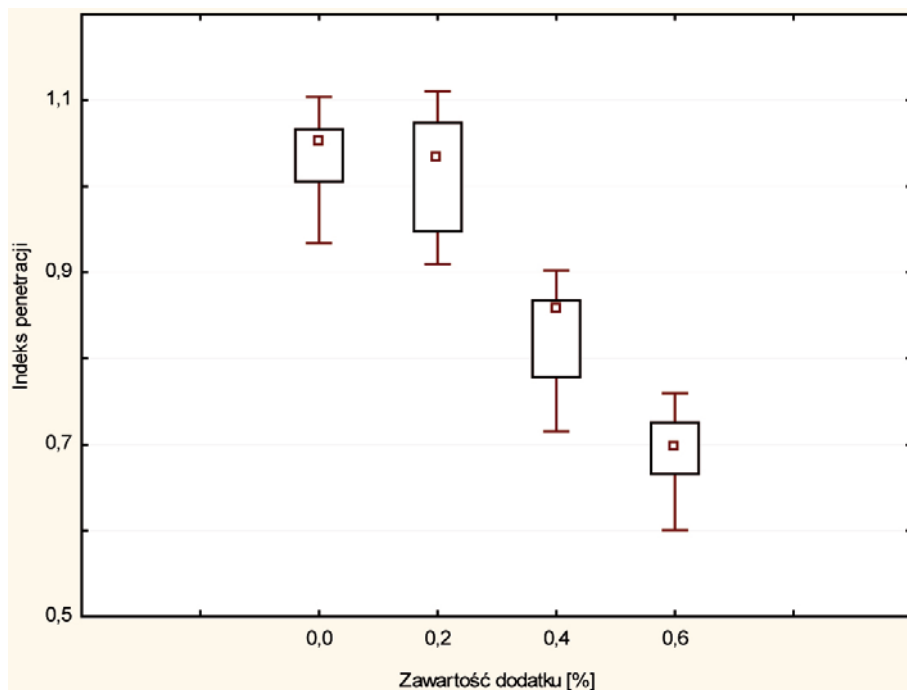
nu lepkości sprężystego lepiszcza. Na podstawie uzyskanych wyników badań dokonano oceny wpływu dodatku THPP w analizowanym przedziale na indeks penetracji PI. Wpływ dodatku badanego środka na indeks penetracji obliczono na podstawie wzoru:

$$PI = \frac{20 \cdot T_{PIK} + 500 \cdot \lg P - 1952}{T_{PIK} - 50 \lg P + 120} \quad (1)$$

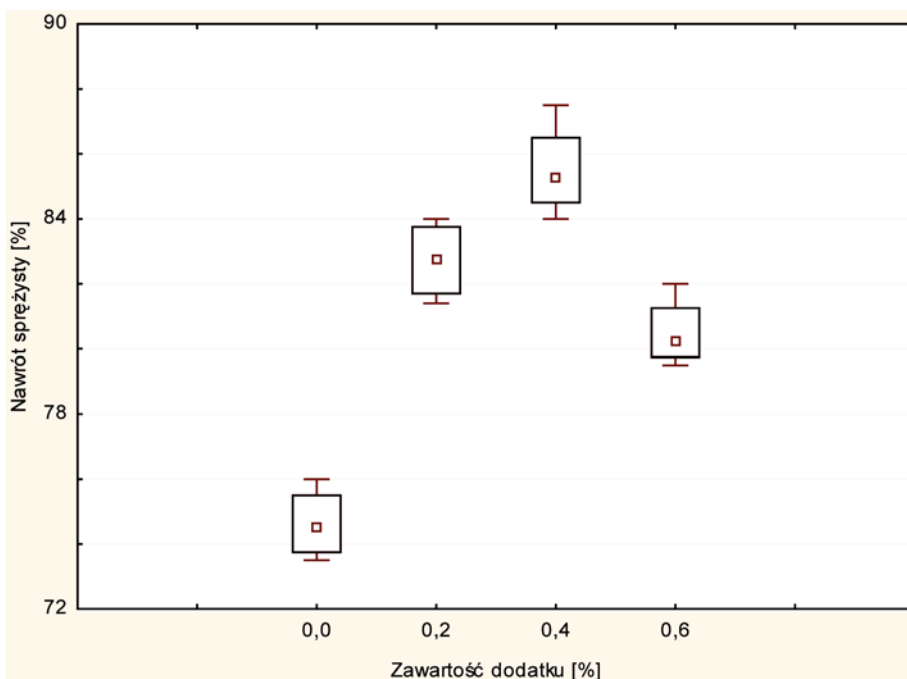
w którym:

T_{PIK} – temperatura mięknięcia [°C]

P – penetracja w 25°C [0,1 mm]



Rys. 4. Wpływ dodatku THPP na indeks penetracji asfaltu PMB 45/80-55



Rys. 5. Wpływ dodatku THPP na nawrót sprężysty asfaltu PMB 45/80-55

Na podstawie uzyskanych wyników badań obliczono wartości indeksu penetracji w zależności od wielkości dodatku THPP. Wartości indeksu penetracji asfaltu PMB 45/80-55 bez i z dodatkiem THPP przedstawiono na rysunku 4.

Analizując uzyskane wyniki badań zaobserwowano, że w przedziale dodatku THPP od 0,0% do 0,2% wpływ badanego środka na indeks penetracji jest niewielki. Zwiększenie dodatku powoduje spadek wartości ocenianego parametru oraz niewielką zmianę konsystencji badanego lepiszcza. Najniższą wartość uzyskano przy 0,6% dodatku THPP i była ona niższa o około 0,3% od wartości uzyskanej w przypadku lepiszcza referencyjnego. Zauważono tendencję do spadku badanego indeksu. Świadczyć to może o tym, że wraz ze zwiększaniem wielkości dodatku zachodziły zmiany stanu lepiszcza z zol-żelowego w zolowy.

Nawrót sprężysty

W dalszej kolejności dokonano oceny wpływu środka THPP na nawrót sprężysty lepiszcza modyfikowanego. W celu oceny prawidłowości wykonanych badań oznaczano rozszerzoną niepewnością pomiaru, która nie przekroczyła wartości 2%, co przedstawia rysunek 5.

Analizując uzyskane wyniki badań stwierdzono, że dodatek THPP powoduje wzrost nawrotu sprężystego lepiszcza. W przedziale dozowania środka od 0,2% do 0,4% wartość badanej cechy zwiększa się. Maksymalną wartość osiąga przy zawartości 0,4%, która jest większa o około 20% od wyników uzyskanych dla asfaltu referencyjnego PMB 45/80-55. Wartość badanego parametru spada o 5% przy stężeniu THPP równym 0,6% w porównaniu z lepiszczem z zawartością dodatku na poziomie 0,4%. Jednak

wartość ta pozwala zaklasyfikować asfalt z dodatkiem THPP do grupy lepiszczy o większym stężeniu modyfikatora. Wzrost wartości nawrotu sprężystego pozwala zakładać, że lepiszcze z dodatkiem THPP jest bardziej sprężyste i w większym stopniu może zrównoważyć odkształcenia w MMA niż asfalt bez dodatku. Zastosowanie dodatku THPP podniosło wartość badanego parametru do poziomu wymaganego od lepiszczy o większym stężeniu modyfikatora.

Spadek wartości nawrotu sprężystego w próbkach z zawartością THPP na poziomie 0,6% spowodowany mógł być osłabieniem spójności międzycząsteczkowej w lepiszczu przez zbyt duże stężenie badanego środka.

Lepkość dynamiczna

Lepkość dynamiczna lepiszcza jest jedną z podstawowych cech reologicznych asfaltu [9, 22]. Parametr ten definiowany jest jako opór ciała płynnego wobec wszelkich zmian położenia jego elementów objętościowych [9, 16]. W przypadku lepiszczy asfaltowych tarcie wewnętrzne występuje w wyniku działania sił międzycząsteczkowych (kohezji) przy przesunięciu się warstw cieczy [5, 10]. Badanie wykonano w wiskozymetrze rotacyjnym składającym się z układu współosiowo przemieszczających się cylindrów.

Wartości lepkości dynamicznej obliczono na podstawie wzoru:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \quad (2)$$

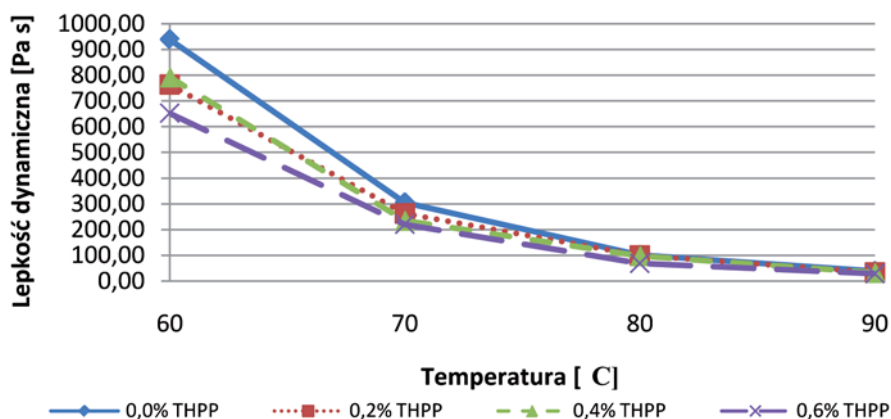
w którym:

η – naprężenie ścinające [Pa]

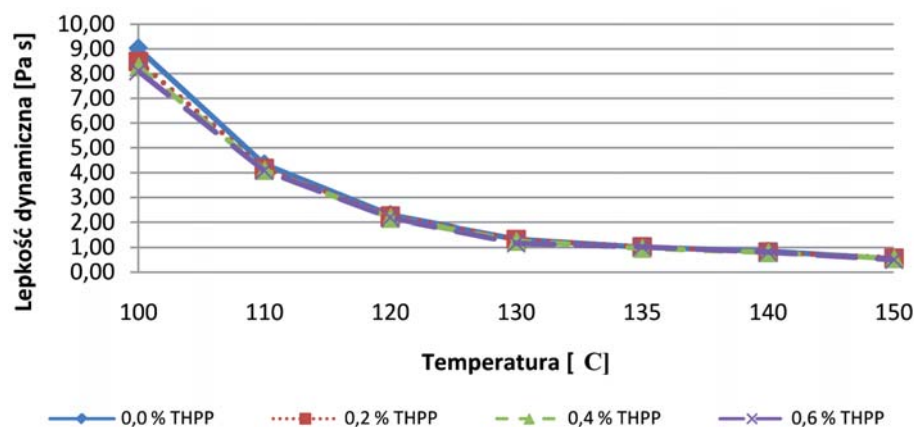
$\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania wyrażana [s^{-1}]

Badanie lepkości dynamicznej wykonano na lepiszczu 45/80-55 z dodatkiem THPP o zawartości od 0% do 0,6% w przedziale temperatury od 60°C do 150°C (z krokiem co 10°C). W celu uniknięcia pseudoplastycznego zachowania się cieczy, wszystkie badania lepkości dynamicznej asfaltów wykonano przy prędkości ścinania 1 s^{-1} . Na podstawie uzyskanych wyników badań oznaczono rozszerzoną niepewność pomiaru, która w przypadku wszystkich próbek nie przekroczyła 2%. Wyniki badań wpływu THPP na lepkość asfaltu PMB 45/80-55 przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że w przedziale temperatury od 60°C do 90°C i przy dozowaniu środka THPP od 0,2% do 0,6% ma miejsce zmiana wartości lepkości dynamicznej lepiszcza w stosunku do asfaltu podstawowego. Dodatek w ilości 0,6% w stosunku do masy lepiszcza w temperaturze 60°C powoduje znaczne zmniejszenie wartości lepkości dynamicznej maksymalnie o około 270 Pa s (tzn. 18% w odniesieniu do lepiszcza podstawowego). Zwiększenie temperatury badania do 90°C przy maksymalnym dodatku THPP powoduje zmniejszenie wartości badanego parametru o 10%, co stanowi około 10 Pa s mniej niż wartość lepkości dynamicznej lepiszcza referencyjnego. Natomiast w zakresie temperatury od 100°C do 150°C i dodatku środka THPP od 0,2% do 0,6% w stosunku do masy asfaltu stwierdzono, że zwiększenie zawartości dodatku THPP nie powoduje istotnych zmian wartości lepkości dynamicznej lepiszcza.



Rys. 6. Wpływ zawartości dodatku THPP na lepkość dynamiczną asfaltu w zakresie temperatury od 60°C do 90°C

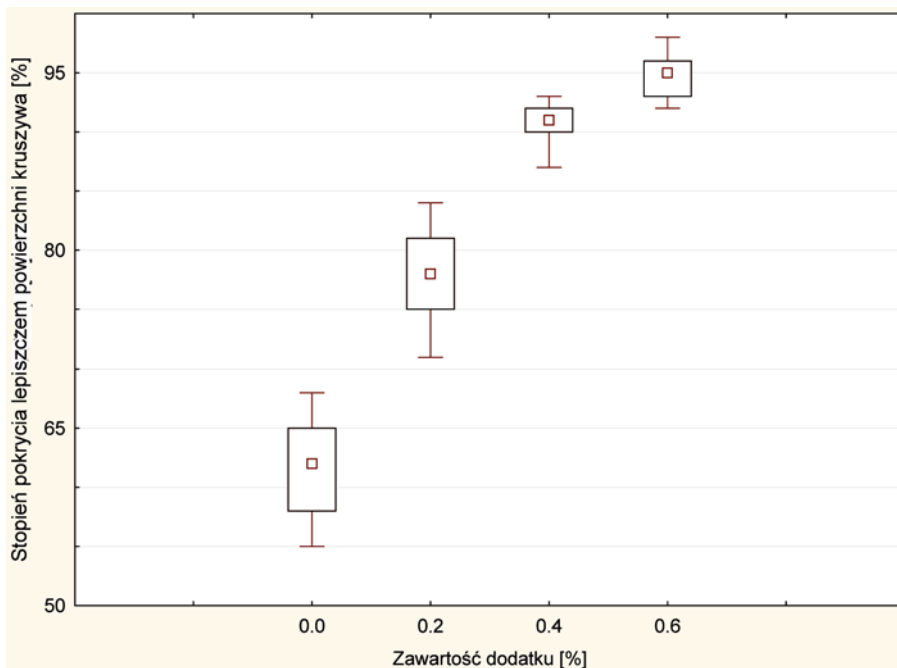


Rys. 7. Wpływ zawartości dodatku THPP na lepkość dynamiczną asfaltu w zakresie temperatury od 100°C do 150°C

Adhezja lepiszcza do kruszywa

Przyczepność lepiszcza do kruszywa jest jednym z najistotniejszych parametrów mających wpływ na trwałość nawierzchni wykonanej z mieszanki mastykowo-grysowej [19, 22]. Ma bezpośredni wpływ na szczelność i odporność warstw nawierzchni asfaltowej na czynniki atmosferyczne [3].

W celu określenia procentowego odmycia asfaltu z powierzchni kruszywa wykonano badanie metodą gotowania z zastosowaniem piaskowca kwarcytowego, w którym zawartość krzemionki SiO_2 zawiera się w granicach od 80 do



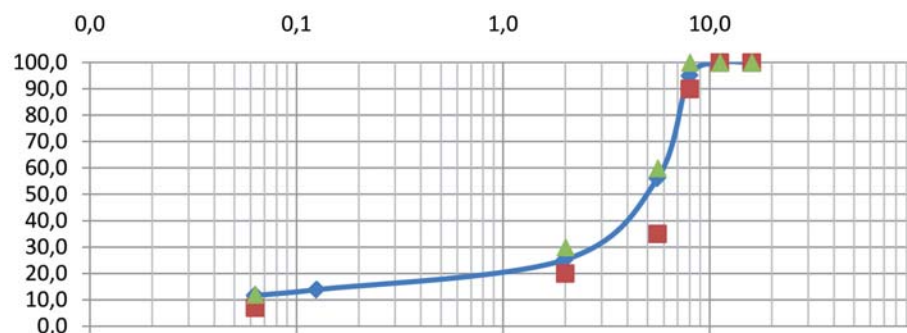
Rys. 8. Wpływ dodatku THPP na przyczepność lepiszcza asfaltu PMB 45/80-55 do kruszywa

100%. Klasyfikuje to omawiane kruszywo do materiałów o odczynie kwaśnym [15]. Zastosowanie takiego rodzaju kruszywa pozwoliło na dokładne określenie badanego parametru w najbardziej niekorzystnych warunkach.

Ocena polega na wizualnej ocenie stopnia odmycia lepiszcza z powierzchni kruszywa. W celu uzyskania bardziej wiarygodnych wyników metoda oceny stopnia odmycia została zmodyfikowana. Polegała na wykonaniu serii zdjęć próbek, które następnie poddane zostały analizie w programie komputerowym, przeznaczonym do oznaczania procentowej wartości adhezji lepiszcza do kruszywa (rys. 8).

Celem ograniczenia błędu pomiaru dokonano oceny niepewności pomiaru przyczepności lepiszcza do kruszywa (adhezji biernej). Uzyskany przedział niepewności nie przekroczył 7%.

W badanym przedziale dozowania środka THPP parametr wzrasta maksymalnie do 94,5%. Pozwala to na stwierdzenie, że wraz ze wzrostem dodatku następować mogło zmniejszenie kąta zwilżania na granicy faz asfalt-kruszywo i wzrost adhezji asfaltu do kruszywa. Przy dodatku THPP w przedziale od 0,4% do 0,6% adhezja przekracza 90%. Oceniając



Rys. 9. Uziarnienie mieszanki mastyksowo-grysowej SMA 8 wg WT-2 2010 [25]

uzyskane wyniki badań stwierdzono, że wzrost dodatku THPP do 0,2% pozwolił na wzrost adhezji o 11% w stosunku do lepiszcza podstawowego. Największą wartość adhezji lepiszcza do kruszywa uzyskano przy 0,6% dodatku w stosunku do masy lepiszcza. Wzrost ten wyniósł średnio 25% więcej aniżeli w przypadku lepiszcza referencyjnego.

Projekt mieszanki SMA

W celu oceny wpływu dodatku THPP na odporność mieszanki mastyksowo-grysowej SMA na działanie wody przyjęto mieszankę SMA 8 do warstwy ścieralnej obciążonej ruchem KR-4 wg Wymagań Technicznych WT-2: 2010 (rys. 9). Mieszankę mineralną zaprojektowano z kruszyw o odczynie kwaśnym, tzn. kruszywo sjenitowe 4/8 mm 41%, piaskowiec kwarcytowy 5/8 – 18,5%, 2/5 – 14% i 0/2 – 15%; mączka wapienna

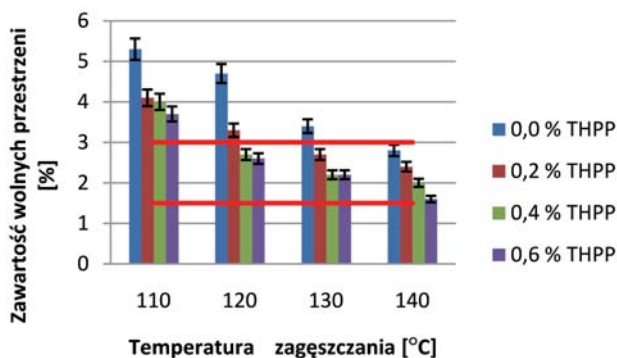
w ilości 11,5%. Zawartość asfaltu modyfikowanego PMB 45/80-55 w mieszance zaprojektowana została doświadczalnie i ustalona w ilości 7% [m/m].

Wpływ dodatku THPP na zawartość wolnych przestrzeni w mieszance SMA wykonywanej w technologii WMA

Badanie zawartości wolnych przestrzeni w mieszance SMA miało na celu określenie wpływu dodatku THPP na zagęszczalność [6, 12] MMA wykonanej w technologii WMA. Zawartość wolnych przestrzeni oznaczono na co najmniej 6 próbkach Marshalla zagęszczanych 2 × 50 uderzeń ubijaka na warstwę. Określenie tego parametru jest jedną z istotniejszych informacji o wpływie środka THPP oraz temperatury zagęszczania na opór zagęszczania mieszanki SMA. Uzyskane średnie wartości wolnych przestrzeni w próbkach z podaniem niepewności pomiaru przedstawiono na rysunku 10.

Analizując uzyskane wyniki badań stwierdzono, że zagęszczanie w temperaturze 140°C umożliwia uzyskanie zawartości wolnych przestrzeni na poziomie około 3,0% niezależnie od ilości zastosowanego dodatku. Natomiast mieszanka wykonywana z asfaltem referencyjnym (bez dodatku) uzyskała blisko 8% wzrost zawartości wolnej przestrzeni w stosunku do mieszanki z zawartością dodatku 0,6% THPP. Minimalne wartości badanego parametru zaobserwowano w mieszance zagęszczanej w temperaturze 140°C i dodatku 0,6% środka THPP. Zawartości dodatku do 0,2% umożli-

wiają uzyskanie około 4% zawartości wolnych przestrzeni w temperaturze zagęszczania 130°C. Mieszanka z lepiszczem PMB 45/80-55 przy dodatku w przedziale od 0,4% do 0,6% spełnia wymagane parametry [25] przy temperaturze zagęszczania 120°C. Próbkki wykonywane z lepiszczem referencyjnym w niższych temperaturach zagęszczania w przedziale temperatur od 130°C do 110°C, nie spełniały warunków zawartych w Wymaganiach Technicznych. SMA zagęszczana w temperaturze 110°C i przy zawartości dodatku 0,6% uzyskała około 40% mniejszą zawartość wolnych przestrzeni niż analogicznie zagęszczane próbki bez zastosowania dodatku. Zwiększanie zawartości THPP i temperatury zagęszczania powodowało zmniejszenie zawartości wolnej przestrzeni w badanej mieszance.



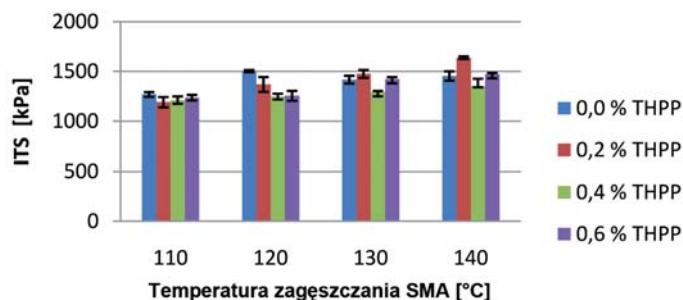
Rys. 10. Wpływ dodatku THPP i temperatury zagęszczenia na zawartość wolnych przestrzeni w mieszance SMA

Na podstawie wykonanego zakresu badań i uzyskanego wykresu stwierdzono, że zwiększanie dodatku ponad 0,6% powodować może przegęszczanie się mieszanki w temperaturze 130–140°C, co będzie niekorzystnie wpływać na odporność na deformacje trwałe mieszanek stosowanych do warstw ścieralnych.

Wpływ dodatku THPP i temperatury zagęszczania na odporność mieszanki SMA na oddziaływanie wody

Odporność mieszanki na oddziaływanie wody jest jedną z podstawowych cech trwałości SMA. Odporność ta świadczyć może o zmianie wytrzymałości mechanicznej warstwy ścieralnej. Zmniejszenie wytrzymałości powodować może spadek odporności na powstawanie deformacji trwałych, spękań czy wykruszeń [2, 8].

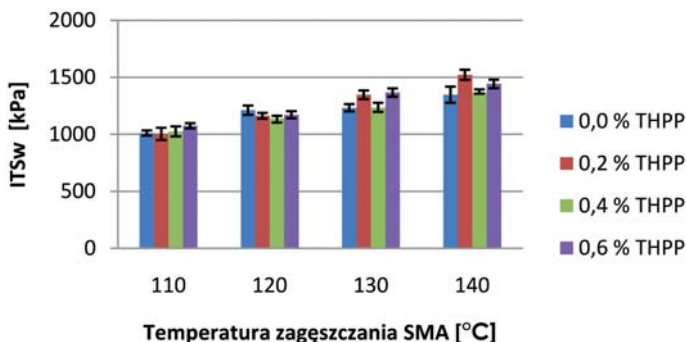
Istotny wpływ na odporność mieszanki na działanie wody ma adhezja lepiszcza do kruszywa. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem dodatku THPP wzrastała adhezja asfaltu w teście gotowania. W celu określenia wpływu temperatury zagęszczania i zawartości dodatku THPP na odporność mieszanki SMA na oddziaływanie wody w pierwszym etapie wykonano badanie na próbkach porównawczych bez pielęgnacji w wodzie. Uzyskane wartości odporności na pośrednie rozciąganie przedstawiono na rysunku 11. Oceniono rozszerzone niepewności zgodnie z wymaganiami [24], która nie przekroczyła maksymalnie 5% w badanym przedziale zastosowanego dodatku i temperatury zagęszczania.



Rys. 11. Wpływ dodatku THPP i temperatury zagęszczenia na wytrzymałość w rozciąganiu pośrednim próbek kondycjonowanych w powietrzu ITS

Największą wartość badanego parametru uzyskały mieszanki zagęszczane w temperaturze 140°C. Natomiast najniższe wartości uzyskano przy temperaturze zagęszczania 110°C. Maksymalną wartość osiągnęła mieszanka zagęszczana z asfaltem referencyjnym i wyniosła około 1500 KPa. Wartość minimalną parametr osiągnęły w próbkach zagęszczanych w temperaturze 140°C z dodatkiem 0,6%, która była mniejsza o około 6%. Ponadto obniżenie parametru zaobserwowano również wraz ze spadkiem temperatury zagęszczania mieszanki SMA.

Kolejnym etapem było określenie wytrzymałości w pośrednim rozciąganiu na próbkach mieszanki SMA pielęgnowanych w wodzie z jednym cyklem zamrażania (rys. 12). Uzyskane wartości badanego parametru są odwrotne do wyników otrzymanych w przypadku próbek bez pielęgnacji w wodzie. Najniższe współczynniki uzyskano na próbkach wykonanych z asfaltem referencyjnym niezależnie od temperatury zagęszczania. Natomiast największe wartości uzyskano na próbkach z dodatkiem THPP 0,2% i 0,6% w temperaturze zagęszczania 130°C i 140°C. W przedziale temperatury zagęszczania od 110°C do 120°C zaobserwowano spadek wartości w porównaniu do mieszanki wykonywanej z dodatkiem THPP 0,4%. Poza tym oceniany środek korzystnie wpływa na badany parametr zwiększając jego wartość w przedziale od 0% do 0,4%.



Rys. 12. Wpływ dodatku THPP i temperatury zagęszczenia na wytrzymałość na rozciąganie pośrednie próbek pielęgnowanych w wodzie ITS

W celu sprawdzenia poprawności wykonanych badań dokonano oceny poziomu istotności [17] oddziaływania dodatku THPP oraz temperatury zagęszczania mieszanki SMA na odporność na działanie wody. Analizę wykonano

z zastosowaniem programu Statistica, natomiast do szacowania wartości poziomu istotności wykorzystano analizę wariancji (ANOVA).

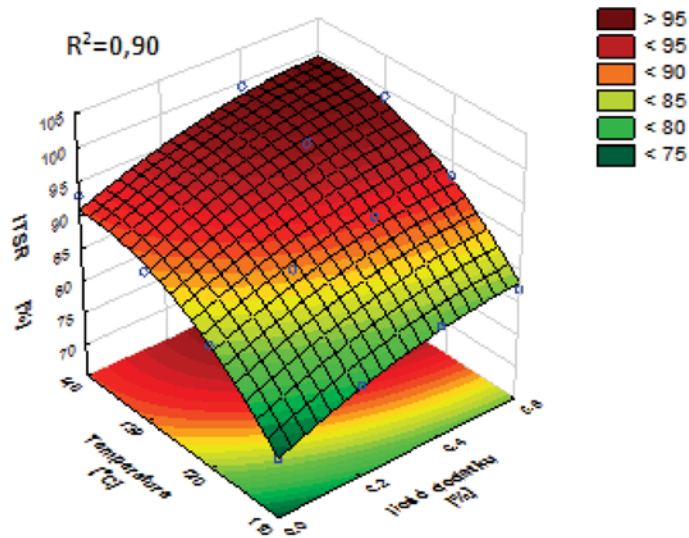
Tabela 1. Ocena istotności wpływu temperatury zagęszczania oraz zawartości dodatku THPP na wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie pośrednie mieszanki mastyksowo-grysowej SMA

Efekt	Zmienność (ss)	Stopnie swobody	Zmienność międzygrupowa (MS)	Rozkład F	Wartość p
Wolny wyraz	519 516,6	1	519 516,6	20 728,33	<0,001
Temperatura zagęszczania	1 372,6	3	457,5	18,25	<0,001
THPP	812,4	3	270,8	10,80	<0,001
Temp.zag.* THPP	132,9	9	14,8	0,59	0,799
Błąd	1 203,0	48	25,1		

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań odporności na oddziaływanie wody i mrozu na mieszankę SMA stwierdzono, że wielkość dodatku THPP oraz temperatura zagęszczania ma statystycznie istotny wpływ na badany parametr, ponieważ p-value jest mniejsze od zakładanego poziomu istotności $\alpha=0,05$. Natomiast na podstawie ana-

Tabela 2. Ocena parametrów modelu dla wskaźnika wytrzymałości na rozciąganie pośrednie mieszanki mastyksowo-grysowej SMA

Efekt	Parametr	Bł. Statyst.	Test t	Wartość p
Wyraz wolny	67,72188	5,617503	12,05551	<0,001
Temp. zagęszczania	4,31312	3,306756	1,30434	0,007
Temperatura zag. ²	-0,01562	0,605751	-0,02579	0,979
THPP	7,22125	3,306756	2,18379	0,033
THPP ²	-0,81250	0,605751	-1,34131	0,185
Temperatura zag. * THPP	-0,04000	0,484601	-0,08254	0,934



Rys. 13. Wpływ dodatku THPP i temperatury zagęszczania na odporność mieszanki mastyksowo-grysowej na oddziaływanie wody (ITSR)

lizy statystyki F zestawionych w tabeli 1 nie zaobserwowano interakcji wielkości dodatku THPP oraz temperatury zagęszczania w odniesieniu do odporności mieszanki SMA na działanie wody.

W celu prawidłowego opisanie uzyskanych wartości zastosowano plan czynnikiowy 4×4 . Zastosowanie tego modelu umożliwiło określenie wpływu badanych cech na powierzchnię odpowiedzi [7] odporności na działanie wody (wskaźnik ITSR). Na podstawie przyjętego modelu statystycznego wykonano obliczenia w programie Statistica, a wartości opisujące płaszczyznę odpowiedzi zestawiono w tabeli 2. Na podstawie podanych w tabeli 2 parametrów powierzchni wykonano interpretację graficzną (rys. 13).

Analizując płaszczyznę regresji stwierdzono, że zawartość dodatku THPP i temperatura zagęszczania wpływają na parametr ITSR. Wyniki badań pozwalają stwierdzić, że maksymalną wartość ITSR osiągną w próbkach zagęszczanych w temperaturze 140°C przy zawartości dodatku 0,6%. Wartość ITSR wymaganą ≥ 90 osiągnięto przy temperaturze zagęszczania 120°C w przedziale od 0,4% do 0,6% dodatku. Zastosowanie dodatku o zawartości 0,2% pozwoliło bezpiecznie obniżyć temperaturę zagęszczania o 10°C. Mieszanka SMA z lepiszczem referencyjnym nie uzyskała wymaganego parametru przy temperaturze zagęszczenia 130°C. Trend funkcji wskazuje, że obniżanie koncentracji badanego środka oraz temperatury zagęszczania powoduje obniżenie wodoodporności mieszanki SMA. Obecność środka zmniejszającego napięcie powierzchniowe w kontekście odporności na działanie wody i temperatury zagęszczania mieszanki SMA nie może być pominięta i wymaga dalszej analizy.

Wnioski

Na podstawie przeglądu literatury, wykonanych badań lepiszcza i mieszanki mastyksowo-grysowej SMA wytwarzanej w technologii WMA z zastosowaniem dodatku THPP i obniżonej temperatury zagęszczania sformułowano następujące wnioski:

- dodatek THPP w przedziale od 0% do 0,4% w stosunku do masy lepiszcza powoduje wzrost nawrotu sprężystego, natomiast zwiększenie dodatku powyżej tego przedziału powodować może niekorzystne zmiany w kompozycie asfaltowym,
- dodatek THPP w badanym przedziale dozowania poprawia adhezję bierną lepiszcza do kruszywa o odczynie kwaśnym zastosowanego w mieszance SMA,
- zwiększanie dodatku w przedziale od 0% do 0,6% w stosunku do masy asfaltu powoduje spadek zawartości wolnych przestrzeni w badanej mieszance SMA 8,
- wysoki dodatek THPP może powodować obniżenie zawartości wolnych przestrzeni poniżej 3%,
- zwiększanie dodatku THPP powoduje wzrost odporności na oddziaływanie wody mieszanki mastyksowo-grysowej zagęszczanej w obniżonej do 120°C temperaturze,
- dodatek THPP i temperatura zagęszczania mają istotny wpływ na odporność mieszanki mastyksowo-grysowej na oddziaływanie wody.

Bibliografia

- [1] Arega Z., Bhasin A.: *Binder Rheology and Performance in Warm Mix Asphalt*, Published August 2012 Center for Transportation Research The University of Texas at Austin 1616 Guadalupe St, Suite 4.202 Austin, TX 78701
- [2] Błażejowski K., SMA. *Teoria i praktyka*, Rettenmaier Polska sp. z o.o., Warszawa 2007
- [3] Błażejowski K., Styk S., *Technologia Warstw asfaltowych* Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2011
- [4] D'Angelo J., Harm E., end team: *Warm-Mix Asphalt: European Practice American*. Trade Initiatives P.O. Box 8228, Alexandria, February 2008
- [5] Gaweł I., Kalabińska M., Piłat J., *Asfalty Drogowe*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2001
- [6] Iwański M., Mazurek G., *Zależność temperatury zgęszczania betonu asfaltowego w aspekcie modyfikatora niskowiskozowego*, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Poznań 2009, październik 2009, s. 94-102
- [7] Jańczewski D., Różycki C., Synorodzki L., *Projektowanie procesów technologicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010
- [8] Judycki J., Jaskuła P., *Badania oddziaływania wody i mrozu na betony asfaltowe o zwiększonej odporności na deformacje trwałe*, *Drogownictwo* 12/1999
- [9] Kalabińska M., Piłat J., *Reologia asfaltów i mas mineralno-asfaltowych*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982
- [10] Kalabińska M., Piłat J., *Technologia materiałów i nawierzchni drogowych*, Wyd. PWN, Warszawa 1985
- [11] Mieczkowski P., *Dodatki powierzchniowo aktywne substancji (PAS) w technologii drogowej*, *Magazyn Autostrady*, 6/2014
- [12] Mazurek G., Nowakowski K., *The evaluation of SMA mixture properties with the surface-active agent in WMA technology*, Matbud, Kraków 2015
- [13] Nowakowski K., *Evaluation of the THPP effect on compactability enhancement of SMA 8 S mix produced in WMA technology*, Transcom 2015, 22-25 June, Zylina
- [14] Rabek J.F., *Współczesna wiedza o polimerach*, Wyd. PWN, Warszawa 2008
- [15] Radziszewski P., Kalabińska M., Piłat J., *Materiały drogowe i nawierzchnie asfaltowe*, Wyd. WKŁ, Warszawa 1995
- [16] Shramm G., *Reologia Podstawy i Zastosowanie*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań 1998
- [17] Stanisław A., *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach medycznych Tom 1. Modele liniowe i nieliniowe*, Statsoft, Kraków 2007
- [18] Stefańczyk B., *Materiały drogowe*, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1989
- [19] Stefańczyk B., Mieczkowski P., *Dodatki, katalizatory i emulgatory w mieszankach mineralno-asfaltowych*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010
- [20] Stefańczyk B., Mieczkowski M., *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Wykonawstwo i badania*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2009
- [21] Trzaska E., *Lepkość asfaltów i europejskie metody jej badania*, Nafta-Gaz, lipiec 2012
- [22] Xiao F, V.S. Punith, S.N. Amirhanian, *Effects of non-foaming WMA additives on asphalt bitumens at high performance temperatures*, Fuel 2011
- [23] Zivorad L., *Design of Experiments in Chemical Engineering*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. K Ga A, 2004
- [24] EA-04/16 rev 00 December 2013 EA guidelines on the expression of uncertainty In qualitative testing
- [25] Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych WT-2 – 2010 Mieszanki mineralno-asfaltowe Wytyczne techniczne – część 2, Warszawa 2010



PAWEŁ SIKORSKI

Politechnika Świętokrzyska
p.sikorski@vp.pl

Wymiarowanie płyt żelbetowych nawierzchni lotniskowych klasycznie zbrojonych

Do budowy betonowych nawierzchni lotniskowych zaleca się stosowanie betonu o klasach wytrzymałości na ściskanie od C35/45 do C45/55, ze względu na konieczność przejmowania przez nawierzchnię sił poziomych występujących w trakcie manewru hamowania statku powietrznego oraz uderzeń dynamicznych przy nieudanym lądowaniu. Potrzeba zwiększania trwałości nawierzchni uzasadnia tendencję sukcesywnego podnoszenia klasy wytrzymałości betonu. Podnoszenie klasy wytrzymałości skutkować może zmianą charakteru pracy nawierzchni betonowej, która staje się konstrukcją o podwyższonej wrażliwości na zarysowanie pod obciążeniem dynamicznym [4]. Konstrukcją pozwalającą na zwiększenie nośności bez konieczności zbytniego podnoszenia klasy betonu i zmiany geometrii nawierzchni (głównie grubości) są płyty żelbetowe. Zbrojenie w nawierzchniach żelbetowych wyko-

nuje się głównie w postaci siatek prętów ułożonych w kierunku poprzecznym i podłużnym w rozstawie 0,15–0,35 m. Średnice prętów zbrojeniowych powinny wynosić 0,012–0,016 m. Zastosowanie zbrojenia ogranicza możliwość powstawania przypadkowych pęknięć płyt na skutek nagłych zmian termicznych oraz przeciążeń konstrukcji [2].

Obliczanie nawierzchni żelbetowych

Wprowadzenie zbrojenia w płytach nawierzchni lotniskowych umożliwia ustalenie racjonalnej grubości płyt oraz optymalizację wymiarów geometrycznych.

Dane wyjściowe

- Samolot obliczeniowy:
- Boeing 787-8 – Dreamliner