



JÓZEF JUDYCKI

jojudyck@pg.gda.pl



PIOTR JASKUŁA

piotr.jaskula@wilis.pg.gda.pl



BOHDAN DOŁŻYCKI

bohdan.dolzycki@wilis.pg.gda.pl



MAREK PSZCZOŁA

marek.pszczola@wilis.pg.gda.pl



MARIUSZ JACZEŃSKI

mariusz.jaczenski@wilis.pg.gda.pl



DAWID RYŚ

dawid.rys@wilis.pg.gda.pl



MARCIN STIENS

marcin.stiens@pg.gda.pl

Politechnika Gdańska

Badania spękań niskotemperaturowych podbudów z AC WMS na nowobudowanej autostradzie A1 w Polsce.

Część 2 – Analiza przyczyn powstania spękań nawierzchni

W okresie ostatnich kilku lat na wielu odcinkach nowych autostrad, dróg ekspresowych oraz pozostałych drogach krajowych w Polsce do warstw podbudowy i warstwy wiążącej zastosowano beton asfaltowy o wysokim module sztywności AC WMS. Podczas realizacji nowych odcinków autostrad A1, A2, A4 i drogi ekspresowej S7 w lutym 2012 r. na skutek mrozów powstały spękania na podbudowach z betonu asfaltowego AC WMS, które zostały wykonane w okresie lata i jesieni 2011 r. i nie zostały przykryte warstwą wiążącą i ścierną na okres zimy. Problem tak dużej liczby spękań zaskoczył i zaniepokoił inżynierów drogowych i stał się tematem gorącej dyskusji także w środkach masowego przekazu. Dotychczas nie zaobserwowano tak powszechnie występujących pęknięć nawierzchni powstałych podczas jednej zimy.

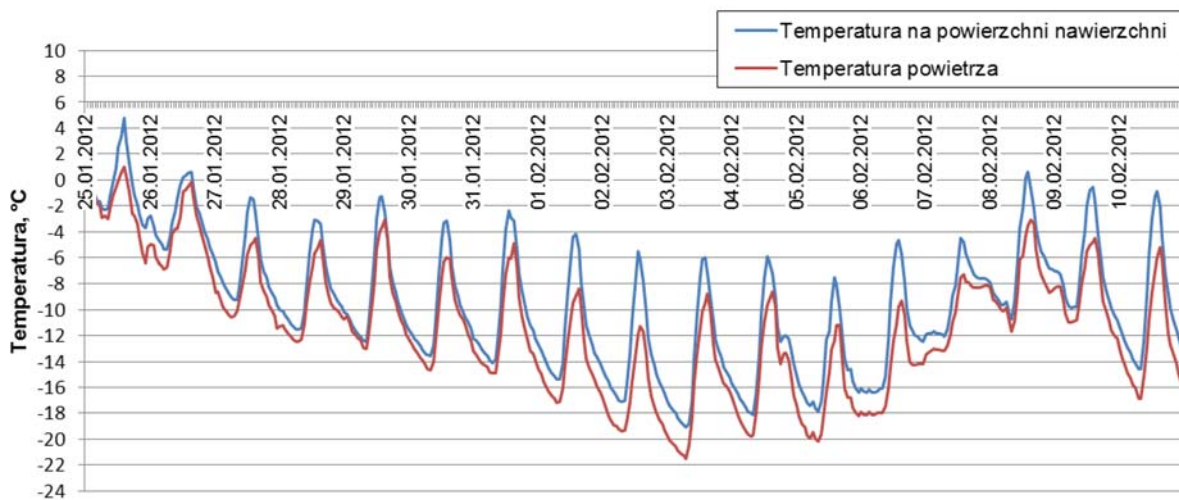
Artykuł jest drugą częścią tekstu opisującego problem spękań niskotemperaturowych podbudów z mieszanek AC WMS, które powstały na nowo budowanej autostradzie A1. W pierwszej części zaprezentowano zarys problemu, opisano najważniejsze wymagania dotyczące mieszanek AC WMS, przedstawiono wyniki oceny terenowej stanu spękań nawierzchni oraz wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych na próbkach pobranych z nawierzchni. W niniejszym artykule opisano przyczyny powstania spękań, biorąc pod uwagę temperatury powietrza i nawierzchni, oszacowanie klasy Performance Grade (PG) lepszą bitumicznego, jednorodność

konstruowanej nawierzchni i obliczenia naprężeń termicznych powstających w podbudowach z mieszanek AC WMS. Artykuł zakończono zaleceniami technologicznymi, które dotyczą naprawy powstałych spękań niskotemperaturowych, wykonania warstw z mieszanek AC WMS oraz wykonania połączeń technologicznych i ogólnych zasad stosowania mieszanek AC WMS w Polsce.

Analiza temperatur powietrza i nawierzchni

Do analizy temperatury jako miarodajny przyjęto okres od 25 stycznia 2012 r. do 10 lutego 2012 r., w którym wystąpiły spękania podbudowy AC WMS. Na podstawie danych meteorologicznych ustalono, że w Polsce utrzymywały się w tym okresie najniższe temperatury zarówno powietrza, jak i nawierzchni drogowych, biorąc pod uwagę cały okres zimy 2011/2012. Uzyskane dane temperaturowe pochodziły z dwóch stacji meteorologicznych zlokalizowanych w pobliżu analizowanego odcinka autostrady A1. Pierwsza ze stacji zlokalizowana była w miejscowości Lubicz, w północnej części budowanego odcinka autostrady, natomiast druga ze stacji w miejscowości Kowal w południowej części tego odcinka. Stacje te zlokalizowane były przy drogach krajowych przecinających budowaną autostradę w odległości nie większej niż 5 km. Do analizy przyjęto pomiar temperatury w stacjach meteorologicznych z powierzchni konstrukcji nawierzchni oraz z 20 cm ponad nawierzchnią. Na rysunku 1 przedstawiono wyniki pomiaru temperatury uzyskane ze stacji meteorologicznej w miejscowości Kowal.

Przedstawione wartości temperatur nawierzchni (rys. 1) dochodzą do -19°C , natomiast powietrza do -22°C . Nie są to wyjątkowo niskie temperatury, ale raczej typowe dla tego regionu Polski. Oprócz niskich temperatur na powstanie spękań duży wpływ ma również prędkość ochładzania się nawierzchni. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie wartości minimalnych temperatur powietrza i nawierzchni zmierzone na analizowanych stacjach meteorologicznych oraz wyznaczone maksymalne prędkości chłodzenia w $^{\circ}\text{C}$ na godzinę. Stwierdzono, że podobne temperatury i prędkości chłodzenia wystąpiły również na innych odcinkach autostrad w Polsce, gdzie w tym samym czasie popękały nowo wybudowane podbudowy AC WMS (autostrada A2 Stryków – Konotopa, autostrada A4 na odcinku Rzeszów Centralny – Rzeszów Wschód).



Rys. 1. Wykres temperatury na powierzchni nawierzchni oraz temperatury powietrza ze stacji Kowal zlokalizowanej niedaleko południowej części odcinka A1

Tabela 1. Wartości minimalnych temperatur powietrza i nawierzchni zmierzone na stacjach meteorologicznych w pobliżu autostrady A1

Lp.	Lokalizacja stacji meteo	Minimalna temperatura nawierzchni, °C	Minimalna temperatura powietrza (20 cm nad powierzchnią), °C	Maksymalna prędkość chłodzenia nawierzchni VT, °C/h	Maksymalna prędkość chłodzenia powietrza VT, °C/h
1.	Kowal	-19,1	-21,5	2,7	3,2
2.	Lubicz	-18,6	-21,4	2,3	5,3

Jak wynika z przedstawionej analizy, spękania niskotemperaturowe wystąpiły w podbudowie AC WMS po okresie występowania temperatury ujemnej, chociaż temperatura nawierzchni nie spadła poniżej -20°C . Można przypuszczać, że długotrwały okres utrzymywania się niskich temperatur, który trwał około 10 dni, spowodował niskotemperaturowe twardnienie fizyczne betonu asfaltowego AC WMS (z ang. *low-temperature physical hardening*), którego skutkiem mógł być wzrost modułu sztywności warstwy podbudowy AC WMS, a w rezultacie wzrost naprężeń termicznych w warstwie i jej spękania. Potwierdzają to wyniki wcześniejszych badań [3, 6, 7, 8, 11, 12, 14, 24, 25, 26, 30]

Ocena Performance Grade (PG) zastosowanego asfaltu i wymaganej temperatury krytycznej dla rejonu budowanej autostrady A1

Do wykonania warstwy podbudowy użyty został beton asfaltowy o wysokim module sztywności AC WMS z asfaltem zwykłym 20/30. Na podstawie badań [21] przeprowadzonych według metody *Superpave* [23] asfalt 20/30 został zakwalifikowany jako PG 82-10, co przedstawiono w tabeli 2. Dla porównania podano również rodzaj funkcjonalny PG uzyskany dla asfaltów 35/50 oraz 50/70.

Wyznaczony rodzaj funkcjonalny PG 82-10 oznacza, że asfalt 20/30 użyty do budowy warstwy podbudowy na analizowanym odcinku autostrady A1 jest przydatny do wykonywania nawierzchni pracującej w temperaturach ujemnych do -10°C .

Tabela 2. Wyniki badań asfaltów według [21]

Rodzaj lepiszcza	Temperatura tamiwości wg Fraassa, °C	Krytyczna temperatura minimalna wg metody BBR, °C	Temperatura mięknięcia wg PIK, °C	Rodzaj funkcjonalny PG
20/30	-9	-14	62	PG 82-10
35/50	-17	-18	55	PG 76-16
50/70	-17	-21	50	PG 64-16

Na podstawie danych temperaturowych z okresu ostatnich 30 lat, uzyskanych ze stacji meteorologicznej zlokalizowanej 10 km od analizowanego odcinka autostrady, wyznaczono wymagany rodzaj funkcjonalny PG asfaltu. Ocenę przeprowadzono według metodyki podanej w *Superpave* [23]. Podobne badania oceniające rodzaj funkcjonalny asfaltu w niskich temperaturach prowadzone były również przez innych badaczy [2, 27, 28]. W tabeli 3 przedstawiono wymagane rodzaje funkcjonalne, jakimi powinny charakteryzować się asfalty, aby mogły być zastosowane na analizowanym odcinku.

Z porównania danych w tabelach 2 i 3 wynika, że zgodnie z metodą *Superpave* [23], do budowy autostrady A1 na rozpatrywanym odcinku powinny być używane następujące asfalty: 50/70 lub bardziej miękkie – do warstwy ścieralnej, 35/50 lub 50/70 – do warstwy wiążącej i 35/50 – do warstwy podbudowy. Dotyczy to wyłącznie asfaltów zwykłych, ponieważ stosowanie ww. metody do asfaltów modyfikowanych nie jest zalecane. W rzeczywistości w okresie zimy 2011/2012 pozostawiono warstwę podbudowy AC WMS z asfaltem 20/30 bez

przykrycia warstwami wiążącą i ścieralną. W konsekwencji zastosowany asfalt 20/30 wykazał się brakiem odporności na działanie niskiej temperatury i wystąpiły liczne spękania niskotemperaturowe.

Tabela 3. Wymagany rodzaj funkcjonalny PG z 50% przedziałem ufności, w poszczególnych warstwach analizowanego odcinka autostrady A1

Rodzaj warstwy	Głębokość od powierzchni nawierzchni, mm	Wymagany rodzaj funkcjonalny PG
Ścieralna	20	PG 46-22
Wiążąca	80	PG 40-16
Podbudowa	200	PG 40-16

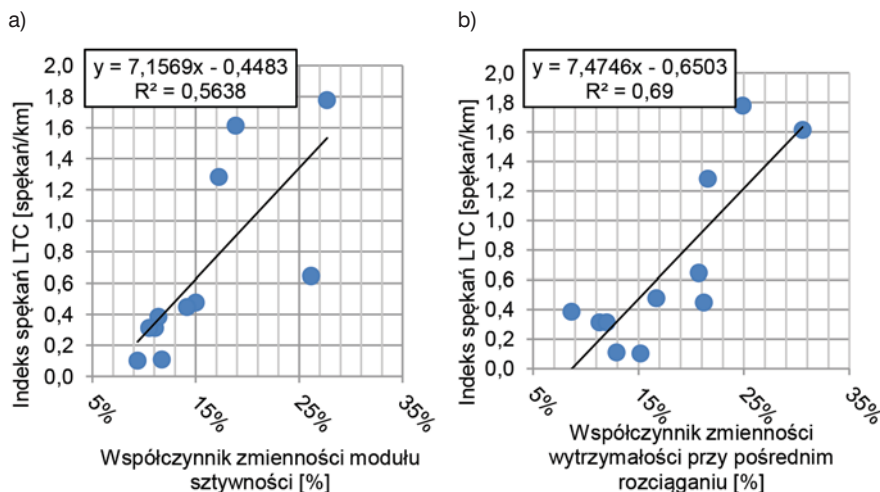
Związek pomiędzy jednorodnością warstw AC WMS a ilością spękań niskotemperaturowych

W tabeli 4 zamieszczono dane ilustrujące związek pomiędzy ilością zaobserwowanych spękań a jednorodnością podbudowy z AC WMS.

Na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 4 można stwierdzić, że jednorodność warstw w dużym stopniu wpływa na indeks spękań poza spoinami technologicznymi LTC, nie ma wpływu natomiast na indeks spękań w spoinach technologicznych JLTC. Na odcinkach niejednorodnych zaobserwowano prawie trzykrotnie więcej spękań poprzecznych

Tabela 4. Zestawienie indeksu spękań podbudowy asfaltowej oraz jednorodności powierzchni

Rodzaj spękania niskotemperaturowego	Ocena wizualna jednorodności powierzchni	Liczba spękań [sztuki]	Długość sekcji [km]	Indeks spękań [spękań/km]
W spoinach technologicznych JLTC	Niejednorodne	16	11,45	1,4
	Jednorodne	43	28,98	1,5
Poza spoinami technologicznymi LTC	Niejednorodne	79	11,45	6,9
	Jednorodne	78	28,98	2,7



Rys. 2. Zależność między a) współczynnikiem zmienności modułu sztywności b) współczynnikiem zmienności wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, a indeksem spękań poza spoiną technologiczną

poza szwami roboczymi niż na odcinkach jednorodnych. Należy pamiętać, że spoiny technologiczne, zwłaszcza kiedy są niewłaściwie wykonane, są najsłabszym punktem podbudowy i w przypadku wystąpienia dużych podłużnych sił rozciągających spowodowanych oziębianiem nawierzchni ulegają uszkodzeniu w pierwszej kolejności. Spękania w spoinach nie są związane z jednorodnością warstwy wykonaną pomiędzy nimi, lecz z jakością robót podczas wykonywania spoiny. Spękania na odcinkach pomiędzy spoinami technologicznymi związane są natomiast głównie z jednorodnością właściwości fizyko-mechanicznych materiałów zastosowanych do wykonania warstwy. Warstwa niejednorodna podczas oziębiania szybciej ulega spękanom niż warstwa jednorodna.

Na podstawie badań laboratoryjnych próbek pobranych z poszczególnych sekcji odcinków określono moduły sztywności oraz wytrzymałość próbek przy pośrednim rozciąganiu. Próbkę zostały pobrane tylko z wybranych sekcji, na których była przeprowadzona ocena wizualna jednorodności oraz wyznaczono na nich indeks spękań. Opierając się na wynikach badań określono średnie wartości i odchylenia standardowe modułów sztywności, wytrzymałości na pośrednie rozciąganie i wskaźników zagęszczenia, oraz wyznaczono współczynniki zmienności jako stosunek odchylenia standardowego do wartości średniej. Współczynniki zmienności charakteryzują jednorodność danej sekcji drogi. Rozrzuty w wynikach badań laboratoryjnych próbek są efektem różnic w zagęszczeniu i składzie poszczególnych próbek i świadczą o jakości i jednorodności wykonanej warstwy.

Na rysunku 2 przedstawiono zależność pomiędzy wynikami badań laboratoryjnych cech mechanicznych a indeksem spękań powstałych poza spoinami technologicznymi na danej sekcji. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem współczynników zmienności zwiększa się indeks spękań na danej sekcji drogi, co świadczy o tym, że jakość i jednorodność wykonania warstw istotnie wpływa na liczbę spękań niskotemperaturowych na danym odcinku drogi. Szczególnie wyraźny jest wzrost indeksu spękań w przypadku wzrostu współczynnika zmienności modułu sztywności i wytrzymałości na pośrednie rozciąganie (rys. 2). Współczynnik zmienności wskaźnika zagęszczenia warstwy w dużo mniejszym stopniu wpływa na indeks spękań, choć zaobserwowano, że na sekcjach gorzej zagęszczonych, o wskaźniku zagęszczenia $I_s < 99\%$, indeks spękań osiągał najwyższe wartości.

Obliczenia naprężeń termicznych w warstwach AC WMS i porównawczo w warstwach AC

W ramach prac obliczeniowych podjęto próbę wyznaczenia temperatury, przy której nastąpi pęknięcie podbudowy AC WMS rozpatrywanej autostrady A1, opierając się

na wynikach badań laboratoryjnych. Ze względu na niewielką ilość dostępnych wyników konieczne było użycie uproszczonej metody obliczeń. Zdecydowano się na wykonanie obliczeń przy użyciu metody pseudo-sprężystej [9]. Moduły sztywności przyjęte do obliczeń wyznaczono na podstawie wyników badań laboratoryjnych. Współczynniki rozszerzalności termicznej wyznaczono opierając się na proporcjach objętościowych mieszanki i współczynnikach kruszyw i asfaltu. Prędkość oziębiania przyjęto jako równą 3°C/h, zbliżoną do rzeczywistej prędkości spadku temperatury występującej w ówczesnym czasie w rejonie autostrady. Ze względu na szerokość nawierzchni asfaltowej wynoszącą w przybliżeniu 12 metrów oraz długość odcinków wynoszącą około 500-600 metrów do obliczeń wybrano model nieskończonej płyty. Naprężenia obliczono ze wzoru:

$$\sigma_x = \frac{1}{1-\mu} \cdot \int S(T, t) \cdot \alpha \cdot dT \quad (1)$$

w którym:

- σ_x – naprężenie powstałe w warstwie pod wpływem oziębiania,
- μ – współczynnik Poissona (przyjęto $\mu=0,25$),
- $S(T,t)$ – moduł sztywności w temperaturze T i w czasie obciążenia $t = 2400$ sekund,
- α – współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej.

W obliczeniach i na rysunkach 3a i 3b uwzględniono rozrzuty wyników badań modułów sztywności i wytrzymałości na rozciąganie. Wyniki obliczeń naprężeń termicznych oraz

wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przedstawiono odpowiednio na rysunkach 3a (sekcje niejednorodne), 3b (sekcje jednorodne). Linie ciągłe przedstawiają wyniki uzyskane dla wartości średnich X modułów i wytrzymałości, natomiast linie przerywane dla wartości średnich $X \pm 1,64 \times SD$, gdzie SD – odchylenie standardowe, co odpowiada prawdopodobieństwu równemu $P = 90\%$, że X mieści się w przedziale $(X \pm 1,64 \times SD)$. W obliczeniach przyjęto, że rozkład wyników jest rozkładem normalnym.

W przypadku podbudów AC WMS z asfaltem 20/30, zarówno dla sekcji jednorodnych, jak i niejednorodnych średnia temperatura pęknięcia, wyznaczona z wykresów wynosi $-26,5^\circ\text{C}$ dla prędkości ochładzania 3°C/h. Zauważyć jednak można duży wpływ rozrzutu wyników badań modułów i wytrzymałości na ryzyko wystąpienia spękań termicznych. Jeżeli chodzi o odcinki jednorodne to stwierdzono, że spękania są prawdopodobne poniżej temperatury $-24,0^\circ\text{C}$, a w przypadku odcinków niejednorodnych poniżej $-20,5^\circ\text{C}$ (rys. 3). Warto dodać, że zanotowane w czasie wystąpienia spękań najniższe temperatury powietrza w tym rejonie zawierały się w przedziale od -14 do -22°C a okres ten trwał około dziesięciu dni. Taki wynik analizy obliczeniowej może być odpowiedzią na pytanie, dlaczego na odcinkach jednorodnych stwierdzono dużo niższą liczbę spękań poprzecznych niż na odcinkach niejednorodnych.

Zalecenia technologiczne

Jako efekt przedstawionych badań opracowano zalecenia technologiczne, które dotyczyły:

- a) naprawy spękań podbudowy przed ułożeniem kolejnych warstw asfaltowych,
- b) wykonania warstw z mieszanek AC WMS oraz wykonania połączeń technologicznych,
- c) stosowania mieszanek AC WMS w Polsce.

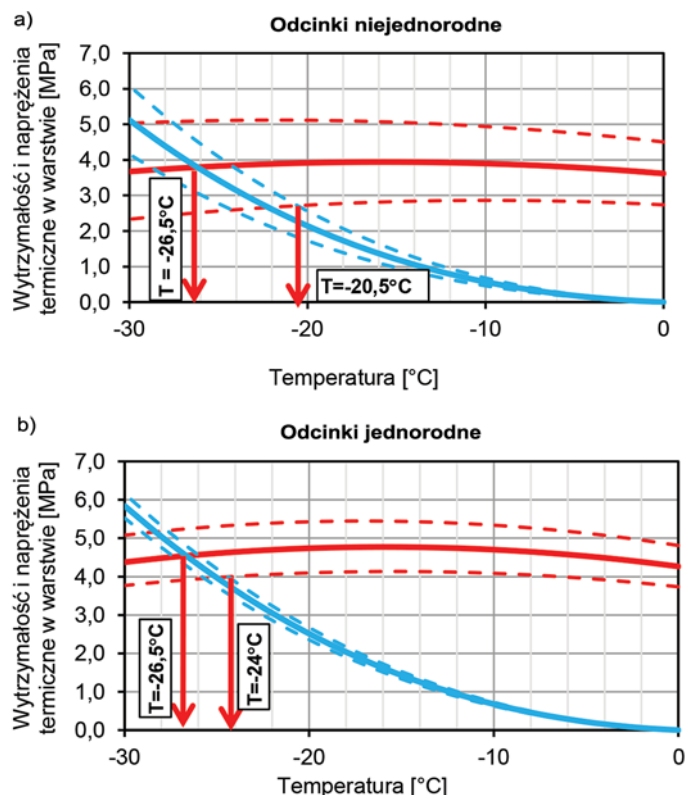
Naprawa spękań podbudowy

Opracowano dwie metody naprawy spękań, aby zapobiec odciążeniu spękań podbudowy na warstwy wyżej leżące:

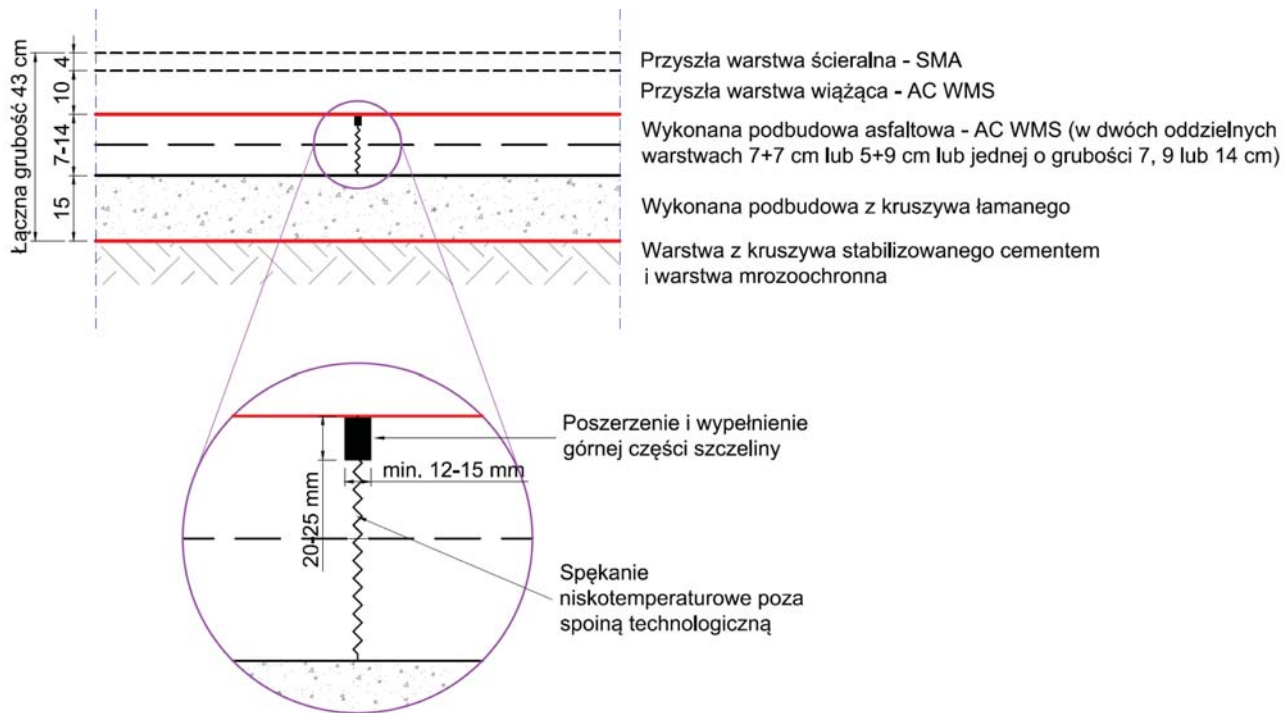
- a) W przypadku spękań o małym rozwarciu istnieje małe prawdopodobieństwo odbicia spękań na wyżej leżące warstwy, dlatego zarekomendowano uszczelnienie spękań masą zalewową z asfaltu modyfikowanego polimerami po wcześniejszym nacięciu, wyczyszczeniu, osuszeniu i zagruntowaniu spękania (rys. 4).
- b) W przypadku spękań o dużym rozwarciu oraz w przypadku rozwartych połączeń technologicznych zarekomendowano uszczelnienie masą zalewową oraz montaż włókna szklanego obtoczonego asfaltem bezpośrednio nad spękaniem na szerokości 2 m (rys. 5).

Wykonanie warstw z mieszanek AC WMS oraz wykonanie połączeń technologicznych

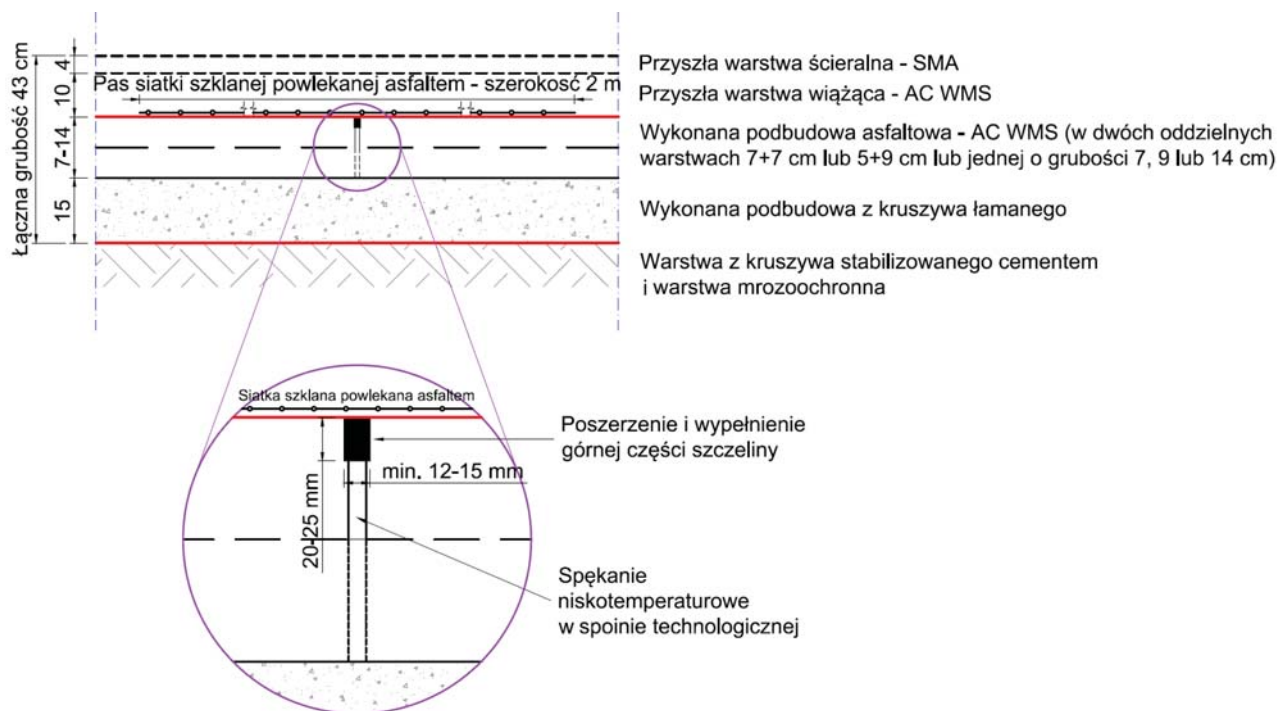
Badania i analizy wykazały, że dla zapewnienia odpowiedniej jakości podbudowy z AC WMS niezbędne jest zapewnienie wysokiej staranności prowadzenia robót zarówno



Rys. 3. Naprężenia termiczne obliczone z metody [9] dla następujących mieszanek: (a) AC WMS 20/30 sekcja niejednorodna; (b) AC WMS 20/30 sekcja jednorodna



Rys. 4. Naprawa spękań o małym rozwarciu w miejscach poza spoinami technologicznymi (LTC)



Rys. 5. Naprawa spękań o dużym rozwarciu w miejscach poza spoinami technologicznymi (LTC) oraz na połączeniach technologicznych (JTLC)

podczas układania warstwy, jak i przy konstruowaniu połączeń technologicznych. Odchylenia we wskaźniku zagęszczenia, zawartości wolnych przestrzeni oraz rozsegregowaniu mieszanki przyczyniają się do powstawania spękań poprzecznych. Dobre zaplanowanie robót jest bardzo ważne, aby zapewnić stałą dostawę mieszanki na budowę i unik-

nąć przerw w pracy rozkładarki. Należy również zwracać uwagę na właściwe zagęszczenie nowej warstwy układanej przy wcześniej ułożonej warstwie (w obrębie połączenia technologicznego). Na połączeniu technologicznym należy stosować taśmy uszczelniające z asfaltu modyfikowanego ponieważ uszczelnienie bitumiczną masą zalewową okaza-

to się niewystarczające. Docinanie warstwy z AC WMS na końcu dziennej działki musi być przeprowadzone z dużą starannością, tak aby uniknąć nacinania warstwy leżącej poniżej. Zalecenia technologiczne układania warstwy z betonu asfaltowego AC WMS powinny być również szczegółowo określone w dokumentacji przetargowej, na przykład poprzez określenie maksymalnej długości do układania podczas jednej operacji (bez wykonywania połączeń technologicznych).

Ogólne zalecenia dotyczące stosowania mieszanek AC WMS w Polsce

Bez względu na zachowanie dobrej praktyki prac budowlanych jest konieczne, aby dostosować wymagania projektowe mieszanek AC WMS do warunków klimatycznych panujących w Polsce. Zamiana lepszycza z asfaltu zwykłego 20/30 na lepszycza wykazujące większą odporność na działanie niskich temperatur, takich jak asfalty wielorodzajowe 35/50 i asfalty modyfikowane polimerami PMB 25/55-60, może być jednym ze sposobów na zmniejszenie ryzyka powstawania spękań niskotemperaturowych na nawierzchniach z zastosowanymi mieszanekami AC WMS. Zamiana ta może przynieść pozytywne efekty w szczególności w przypadku warstwy wiążącej. Ponadto zawartość procentowa asfaltu powinna być tak wysoka, jak to tylko możliwe, przy jednoczesnym zapewnieniu odporności mieszanki na deformacje trwałe.

Podsumowanie

Spękania poprzeczne nowo wykonanej podbudowy asfaltowej na analizowanym odcinku autostrady, które wystąpiły w styczniu oraz lutym 2012 r. mają charakter niskotemperaturowy. Powstały one wskutek działania rozciągających naprężeń termicznych, występujących w warstwach asfaltowych podczas ich oziębiania. Spękania poprzeczne wystąpiły w najłagodniejszych miejscach zlokalizowanych w spoinach technologicznych, miejscach dużych niejednorodności wykonanej warstwy, ale również na jednorodnych odcinkach pomiędzy spoinami technologicznymi.

Stwierdzono, że zanotowane w czasie zimy 2012 r. najniższe temperatury powietrza w tym rejonie mieściły się w przedziale od -14 do -22°C i okres ten trwał około dziesięciu dni. W tym czasie podbudowa asfaltowa popękała. Panujące wówczas temperatury były raczej typowe dla tego rejonu Polski.

Po przeprowadzeniu prac badawczych stwierdzono, że w rozpatrywanym przypadku wystąpiły trzy główne przyczyny spękań niskotemperaturowych:

- zastosowanie do podbudowy nadmiernie sztywnej w polskim klimacie mieszanki mineralno-asfaltowej AC WMS z twardym asfaltem 20/30,
- błędy technologiczne i niedociągnięcia popełnione podczas wykonywania warstwy podbudowy z AC WMS,
- pozostawienie podbudowy z AC WMS bez przykrycia warstwą górną na okres zimy.

Warstwy dolne konstrukcji nawierzchni: górna część nasypu, warstwa odsączająca, warstwa z gruntu lub kruszywa stabilizowana cementem, podbudowa z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie zostały wykonane właściwie i nie miały wpływu na wystąpienie spękań niskotemperaturowych podbudowy asfaltowej.

Biorąc pod uwagę dostępne w Polsce wyniki badań asfaltu zwykłego 20/30 wykonane w 2011 r. stwierdzono, że asfalt 20/30 jest nadmiernie sztywny do zastosowania w warunkach klimatycznych występujących w rejonie budowanej autostrady.

Badania laboratoryjne przeprowadzone w ramach zrealizowanej pracy wykazały, że sztywność wykonanej warstwy z AC WMS z asfaltem 20/30 była wyższa niż sztywność betonu asfaltowego z asfaltem wielorodzajowym 35/50. Stwierdzono po przeprowadzeniu obliczeń, że naprężenia termiczne powstające w podbudowie byłyby mniejsze, gdyby zamiast asfaltu 20/30 użyto bardziej miękkich asfaltów zwykłych 35/50 lub 50/70 albo asfaltu wielorodzajowego 35/50 lub modyfikowanego. Na tej podstawie wywnioskowano, że użycie asfaltu 20/30 zamiast asfaltu wielorodzajowego 35/50 przyczyniło się do powstania spękań niskotemperaturowych.

Stwierdzono błędy w wykonawstwie warstwy podbudowy asfaltowej takie jak: niejednorodność wbudowanej i zagęszczonej mieszanki oraz niewłaściwe wykonanie spoin technologicznych, które w dużej mierze przyczyniły się do powstania uszkodzeń nawierzchni.

Analiza wyników zebranych podczas obserwacji i badań laboratoryjnych wykazała, że istnieje wyraźna korelacja pomiędzy jednorodnością wbudowanej i zagęszczonej warstwy, a ilością spękań poprzecznych. Na ocenianych odcinkach, poza spoinami technologicznymi dwa razy więcej spękań wystąpiło tam, gdzie podbudowa była niejednorodna.

Badania laboratoryjne próbek odwierconych z nawierzchni wykazały, że na odcinkach niejednorodnych wystąpiły większe rozrzuty parametrów takich jak wytrzymałość na rozciąganie i moduł sztywności. Analiza obliczeń naprężeń termicznych i wytrzymałości wykazała, że prawdopodobieństwo wystąpienia spękań warstw niejednorodnych było większe niż na odcinkach jednorodnych.

W rejonie spoin stwierdzono słabe zagęszczenie mieszanki, wyraźnie większą zawartość wolnych przestrzeni, porowaty wygląd przełomu, brak lub nieznaczne ślady asfaltu uszczelniającego spoinę. Ponadto w niektórych spękania w spoinach występowało nacięcie piłą dolnej warstwy technologicznej, które powstało przy zbyt głębokim obcinaniu krawędzi warstwy górnej.

Warstwa podbudowy z AC WMS została pozostawiona na zimę bez przykrycia warstwą wiążącą z AC WMS. Warstwa wiążąca działałaby jako izolacja termiczna. Oziębianie podbudowy z AC WMS byłoby mniejsze, co przełożyłoby się na mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia spękań niskotemperaturowych. Podsumowując, warstwy wykonane z betonu asfaltowego o wysokim module sztywności wykazały w polskim klimacie znaczną wrażliwość na spękania niskotemperaturowe oraz okazały się bardzo wrażliwe na błędy wykonawcze.

Artykuł opracowano na podstawie referatu pt.: „Investigation of low-temperature cracking in newly constructed high modulus asphalt concrete base course of a motorway pavement” przygotowanego przez zespół w składzie: Józef Judycki, Piotr Jaskała, Bohdan Dołycki, Marek Pszczoła, Mariusz Jaczewski, Dawid Ryś, Marcin Stienss na konferencję European Asphalt Pavement Association w Sztokholmie w 2015 r.

Bibliografia

- [1] AASHTO. (2006). PP 42-02 Standard Practice for Determination of Low – Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders. 26th Edition, AASHTO Provisional Standards
- [2] A. Andriescu, S. Iliuta, S.A.M. Hesp, (2004). *Improved Approach to Low Temperature and Fatigue Fracture Performance Grading of Asphalt Cements*. Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association, 49: 123-157
- [3] H.U. Bahia, H. Tabatabaee, R. Valasquez R. (2012). *Importance of bitumen physical hardening for thermal stresses buildup and relaxation in asphalt*. Proceedings of the 5th Euroasphalt and Eurobitume Congress, Istanbul, Turkey
- [4] J. Boratyński (2012). *Design of asphalt mixes resistant to deformation and fatigue (presentation)*. PSWNA Seminar, Miedzeszyn, Poland
- [5] J.F. Corté (2001). *Development and Uses of Hard-Grade Asphalt and of High-Modulus Asphalt Mixes in France*. Transportation Research Circular, 503, Transportation Research Board
- [6] S.A.M. Hesp, S. Iliuta, J.W. Shirokoff (2007). *Reversible aging in asphalt binders*. Energy and Fuel, 21:1112-1121. doi:10.1021/ef060463b
- [7] S.A.M. Hesp, S.N. Genin, D. Scafe, H.F. Shurvell, S. Subramani (2009). *Five years performance review of a Northern Ontario Pavement Trial: Validation of Ontario’s double-edge-notched tension (DENT) and extended Bending Beam Rheometer (BBR) test methods*. Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association, 54:99-126
- [8] S.A.M. Hesp, A. Soleimani, S. Subramani, T. Philips, D. Smith, P. Marks, K.K. Tam (2009). *Asphalt pavement cracking: Analysis of extraordinary life cycle variability in Eastern and Northeastern Ontario*. International Journal of Pavement Engineering, 10(3):209-27. doi:10.1080/10298430802343169
- [9] J.F. Hills & D. Brien (1966). *The fracture of bitumen and asphalt mixes by temperature induced stresses*. Symposium on Pavement Cracking, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 35:294-309
- [10] J.S. Humpreys & C.J. Martin (1963). *Determination of Transient Thermal Stresses in a Slab with Temperature – Dependent Viscoelastic Properties*. Transaction of the Society of Rheology, 7:155 – 170.
- [11] J. Judycki (2014). *Influence of low-temperature physical hardening on stiffness modulus and tensile strength of asphalt concrete and stone mastic asphalt*, Construction and Building Materials, 61: 191-199. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.03.011
- [12] J. Judycki, *Badania niskotemperaturowego twardnienia fizycznego betonu asfaltowego i mieszanki SMA*, Drogownictwo nr 10/2014, s. 311-318
- [13] E.H. Lee, T.G. Rogers (1963). *Solution of Viscoelastic Stress Analysis Problems Using Measured Creep and Relaxation Functions*. Journal of Applied Mechanics, 127 – 133.
- [14] X. Lu, U. Isacsson (2000). *Laboratory study on the low temperature physical hardening of conventional and polymer modified bitumens*. Construction and Building Materials, 14:79-88. doi:10.1016/S0950-0618(00)00012-X
- [15] M. Marasteanu, W. Buttler, H. Bahia, C. Williams, K.H. Moon, E.Z. Teshale, A.C. Falchetto, M. Turos (2012). *Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements*, National Pooled Fund Study – Phase II, Research Project 2012-23. Department of Civil Engineering, University of Minnesota. <http://www.Irrb.org/pdf/201223.pdf>
- [16] C.L. Monismith, G.A. Secor, K.E. Secor (1965). *Temperature Induced Stresses and Deformations in Asphalt Concrete*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 34:248 – 285
- [17] R. Muki, E. Sternberg (1961). *On Transient Thermal Stresses in Viscoelastic Materials with Temperature Dependent Properties*. Journal of Applied Mechanics, 193 – 207
- [18] M. Pszczoła, *Spękania niskotemperaturowe warstw asfaltowych nawierzchni*, praca doktorska, promotor: prof. dr hab. inż. Józef Judycki, Gdańsk, 2006
- [19] M. Pszczoła, J. Judycki, B. Dołycki (2008). *Investigation of transverse cracking of asphalt pavements in the North-Eastern Poland*. 6th International RILEM Conference on Cracking in Pavements: Mechanisms, Modeling, Testing, Detection, Prevention and Case Histories, Chicago USA, 853-860.
- [20] M. Pszczoła, J. Judycki (2009). *Testing of low temperature behaviour of asphalt mixtures in bending creep test* 7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials: Advanced testing and characterization of bituminous materials, Rhodes, Greece, 303- 312
- [21] P. Radziszewski, J. Piłat, J. Król, K. Kowalski, M. Sarnowski (2011). *Weryfikacja wymagań i metod oceny właściwości lepko-sprężystych krajowych asfaltów i asfaltów modyfikowanych*. Raport badawczy, Politechnika Warszawska
- [22] Instytut Badawczy Dróg i Mostów (2008). *WT-2 Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych*. Warszawa
- [23] Superpave (1995). *Performance Grade Asphalt Binder Specification and Testing Series No. 1 (SP-1)*, Asphalt Institute
- [24] H. Tabatabaee, S. Mangiafico, R. Velasquez, H.U. Bahia (2010). *Investigation of low temperature cracking in asphalt pavements, National Pooled Fund Study – Phase II, Task 2, Subtask on Physical Hardening*. University of Wisconsin-Madison
- [25] H.A. Tabatabaee, R. Velasquez, A. Arshadi, H.U. Bahia (2012). *Investigation of low temperature cracking in asphalt pavements, National Pooled Fund Study – Phase II, Task 5 – Modeling of Asphalt Mixtures Contraction and Expansion Due to Thermal Cycling*. University of Wisconsin-Madison
- [26] H.A. Tabatabaee, R. Velasquez & H.U. Bahia (2012). *Modelling Thermal Stress in Asphalt Mixtures Undergoing Glass Transition and Physical Hardening*. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 2296:106 – 114. doi:10.3141/2296-11
- [27] D.E. Watson, J. Zhang, R.B. Powell (2004). *Analysis of Temperature Data for the National Center for Asphalt Technology Test Track*. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 1891:68-75. doi: 10.3141/1891-10
- [28] D. Wegman, J. Weigel, A. Forsberg (1999). *Collaborative Evaluations of Low-Temperature Superpave Performance-Graded Asphalt Binders*. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 1661: 75-82. doi: 10.3141/1661-12
- [29] J.C. Wielinski & G.A. Huber (2011). *Evaluation of French High Modulus Asphalt (EME) in Pavement Structural Design (MEPDG)*. Asphalt Paving Technology, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 80:697 – 718
- [30] M.O. Zhao, S.A.M. Hesp (2006). *Performance grading of the Lamont, Alberta C-SHRP pavement trial binders*. International Journal of Pavement Engineering, 7(3):199-211. doi:10.1080/10298430600715667