



JÓZEF JUDYCKI

Politechnika Gdańska
josef.judycki@wilis.pgda.pl

Twardnienie fizyczne asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych oraz jego wpływ na spękania niskotemperaturowe

Twardnienie fizyczne asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych w zakresie niskich, ujemnych wartości temperatury eksploatacyjnej jest zjawiskiem polegającym na tym, że w czasie przechowywania tych materiałów w jednakowej temperaturze ujemnej, czyli w warunkach izotermicznych, następuje wzrost ich sztywności. Proces niskotemperaturowego twardnienia asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych może być bardzo istotny dla zachowania się nawierzchni asfaltowych w okresie występowania niskich wartości temperatury (w zimie) i może mieć wpływ na spękania niskotemperaturowe. Badania tego zjawiska w świecie trwają od około 20 lat, ale jego przyczyny nie są w pełni zrozumiałe i wyjaśnione. W Polsce zjawisko to jest słabo znane nawet w kręgu specjalistów. Nie było dotychczas na ten temat publikacji w polskich czasopismach, referatów na seminariach i konferencjach, ani dyskusji w gronie specjalistów od asfaltów i nawierzchni asfaltowych. W Katedrze Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej badania tego zjawiska są prowadzone pod kierunkiem autora tego artykułu. Niniejszy artykuł przedstawia ogólne dane na temat niskotemperaturowego twardnienia fizycznego lepiszczy asfaltowych, wpływ twardnienia fizycznego na spękania niskotemperaturowe nawierzchni oraz wybrane wyniki badań własnych tego zjawiska.

Twardnienie fizyczne lepiszczy asfaltowych

Zjawisko twardnienia fizycznego zostało stosunkowo dobrze przebadane na lepiszczach asfaltowych, a w dużo mniejszym stopniu na mieszanek mineralno-asfaltowych. Proces wzrostu sztywności w warunkach izotermicznych występuje w lepiszczach asfaltowych w bardzo szerokim przedziale temperatury. W pracy Soenena i wsp. [12] zaobserwowano wzrost sztywności lepiszczy w przedziale od $+25^{\circ}\text{C}$ do -25°C . Największy wzrost sztywności stwierdzono w przedziale temperatury od 0°C do -15°C . Wzrost sztywności wskutek twardnienia fizycznego zależy od składu chemicznego i rodzaju asfaltu; w niektórych asfaltach może to być znikoma wartość poniżej 10%, ale w innych może sięgać nawet 90% (Soenen i wsp. [12]). Lu i Isacson [8] badali asfalty drogowe modyfikowane i niemodyfikowane w temperaturze: -15°C , -20°C i -25°C i stwierdzili wzrost sztywności wraz ze wzrostem czasu przechowywania; na początku szybki a potem wolniejszy, który po 32 godzinach osiągnął od 40 do 80%. Podobne wartości odnotowali inni badacze.

Twardnienie fizyczne asfaltów jest procesem całkowicie odwracalnym. Po podgrzaniu asfaltu jego sztywność wraca

do poprzedniego stanu, a po oziębieniu następuje ponownie wzrost sztywności i zachodzi proces twardnienia fizycznego z podobną prędkością jak poprzednio.

Na zjawisko to zwrócono uwagę już w latach 20 XX wieku, ale szersze badania rozpoczęły się w amerykańskim programie SHRP na początku lat 90 ubiegłego wieku. Tak jak zawsze, gdy jakieś zjawisko zaczyna być badane, występują w literaturze różne nazwy tego samego procesu i wprowadza to czasem czytelników w błąd. Opisywane zjawisko nazywane jest w literaturze następujący sposób:

- *Physical hardening* – „twardnienie fizyczne”, jest to w zasadzie obecnie najszerszej akceptowany termin, słowo „fizyczne” odróżnia to zjawisko od *chemicznego twardnienia* asfaltu spowodowanego reakcjami chemicznymi utleniania i polimeryzacji oraz odparowaniem lekkich węglowodorów.
- *Steric hardening* – „twardnienie steryczne” lub „przestrzenne” – oznacza ten sam proces. Termin ten jest obecnie rzadziej używany.
- *Physical ageing* – „starzenie fizyczne” w odróżnieniu od starzenia chemicznego, termin ten był dawniej używany nie tylko do asfaltu, ale także do polimerów i innych materiałów.
- *Reversible aging* – „twardnienie odwracalne” – termin użyty w jednej z publikacji z 2007 r. na oznaczenie tego samego zjawiska.

Przyczyny twardnienia fizycznego asfaltów w warunkach izotermicznego przechowywania nie są do końca wyjaśnione. Twardnienie fizyczne jest dość dobrze i od dawna znane w odniesieniu do polimerów i za jego przyczynę przyjmuje się zmniejszenie lub zanik wolnych objętości cząsteczkowych przy przechowywaniu w jednakowej temperaturze ujemnej. Ta sama przyczyna podawana jest także przez badaczy asfaltów jako podstawowa przyczyna ich twardnienia fizycznego. O ile jednak twardnienie fizyczne polimerów przebiega przy ujemnych wartościach temperatury nie wyższych od temperatury ich przejścia szklistego, to z asfaltami jest inaczej. Zjawisko to występuje zarówno poniżej, jak i powyżej temperatury przejścia szklistego asfaltów. Ponadto wiadomo, że temperatura przejścia szklistego w asfaltach jest umowna i nie jest dokładnie określona. Można mówić nie o konkretnej temperaturze przejścia szklistego, ale raczej o pewnym „przedziale wartości temperatury przejścia szklistego” asfaltów.

Jest rzeczą pewną, że twardnienie fizyczne asfaltów zależy od ich składu chemicznego, ale zależności te nie są dotychczas jasno określone. W odniesieniu do asfaltów jako dodatkowe przyczyny twardnienia fizycznego, oprócz

zmniejszenia lub zaniku wolnych objętości cząsteczkowych, wymieniane są: strukturyzacja cząsteczkową i agregacja asfaltenów oraz krystalizacja frakcji parafinowych. Agregacja asfaltenów podczas izotermicznego przechowywania asfaltów w niskiej temperaturze jest raczej powszechnie uznawaną przyczyną twardnienia fizycznego. Twierdzi się, że asfaleny po agregacji w klastry zmniejszają proces relaksacji naprężeń w lepszemu w niskiej temperaturze. Nie ma natomiast pełnej zgodności co do wpływu frakcji parafinowej na proces twardnienia fizycznego. Wyniki badań laboratoryjnych były w tym względzie rozbieżne. Niektórzy badacze nie znajdowali bezpośredniego związku pomiędzy zawartością parafiny a twardnieniem fizycznym, inni zaś twierdzili, że taki związek istnieje i jest istotny. Być może na wyniki poszczególnych badań miał wpływ rodzaj frakcji (długość łańcuchów) parafinowych w asfalcie.

Wielu badaczy stwierdza, że twardnienie fizyczne asfaltów jest zależne w bardzo istotny sposób od źródła ropy naftowej jako surowca do produkcji asfaltów. Wyniki badań wskazują, że modyfikacja polimerami nie zmienia istotnie procesu twardnienia fizycznego i modyfikowany asfalt naśladuje w tym względzie zachowanie się asfaltu bazowego. Stwierdzono taką tendencję, że bardziej wrażliwe na twardnienie fizyczne były asfalty modyfikowane plastomerami (EVA i EBA) niż asfalty modyfikowane elastomerami (SBS i SEBS). Zdaniem niektórych badaczy wpływ sposobu produkcji asfaltu w rafinerii na twardnienie fizyczne jest także bardzo duży. Spotyka się w literaturze poglądy, że problematyczne jest stosowanie pewnych technologii „modyfikacji” asfaltów w rafineriach. Badacze kanadyjscy sugerują, że asfaltami szczególnie podatnymi na twardnienie fizyczne są asfalty „modyfikowane” przez bardzo ostrą oksydację (*harsh air-blowing*) a także „modyfikowane” woskami parafinowymi i odpadowymi olejami silnikowymi. Celowo autor użył w tych miejscach cudzołozu, ponieważ w podobnym kontekście słowo „modyfikacja” najczęściej kojarzy się polskimi czytelnikom z dodawaniem polimerów do asfaltu.

Procesy związane z twardnieniem fizycznym były obserwowane przez badaczy asfaltów od początku XX wieku. Stwierdzano, że przy przechowywaniu niektórych asfaltów w temperaturze pokojowej ponad 24 godziny następuje ich lekkie twardnienie, maleje penetracja i wzrasta lepkość. Przypisywano to „stopniowemu izotermicznemu przejściu „zol-żel”. Bardziej skomplikowane testy wykazywały wzrost sztywności asfaltów przechowywanych w temperaturze pokojowej w czasie wielu dni i miesięcy. Już wtedy pisano o agregacji asfaltenów i krystalizacji frakcji parafinowych jako prawdopodobnych przyczynach tego zjawiska.

Niskotemperaturowe twardnienie fizyczne mieszanek mineralno-asfaltowych

O ile badania twardnienia fizycznego asfaltów są bardzo liczne, to podobne badania mieszanek mineralno-asfaltowych były jak dotychczas bardzo rzadkie. Powodem było między innymi to, że badania lepiszczy odbywały się w standardowym i łatwo dostępnym w USA i Europie Zachodniej aparacie BBR (*Bending Beam Rheometer*) i były bardzo proste. Badania twardnienia fizycznego mieszanek wyma-

gały specjalnego programowania doświadczenia, kosztownego przygotowywania próbek oraz dość drogiego i niestandardowego sprzętu. Ponadto wyniki badań twardnienia fizycznego mieszanek mineralno-asfaltowych były jak dotąd rozbieżne i nie ma jednolitej opinii co do znaczenia tego zjawiska w mieszkankach mineralno-asfaltowych i w nawierzchniach asfaltowych.

Pierwsze wyniki badań twardnienia fizycznego betonu asfaltowego opublikowali w 1999 r. Romero i wsp. [10]. Przeprowadzili je na betonie asfaltowym z użyciem dwóch asfaltów o znanym, dużym twardnieniu fizycznym, w aparacie (TSRST) – *Thermal Stress Restrained Specimen Test* – „test naprężeń termicznych na próbce skrępowanej”. Próbki przed badaniem były przechowywane przez 1h i 24h w temperaturze -15°C , a następnie oziębiane w aparacie TSRST z prędkością 15°C/h . Romero i wsp. [10] stwierdzili we wnioskach z badań występowanie twardnienia fizycznego w przypadku jednej mieszanki i brak tego efektu, w przypadku drugiej. Ich wyniki charakteryzowały się bardzo dużymi rozrzutami zarówno co do temperatury pęknięcia, jak i co do wielkości naprężeń niszczących. Ponadto badano bardzo małą liczbę próbek i trudno na podstawie tych badań wyciągnąć jednoznaczne wnioski. Lu i Isacson [8] w podobnych badaniach TSRST także nie stwierdzili wyraźnego efektu twardnienia fizycznego. Przydatność badania TSRST do oceny twardnienia fizycznego może być jednak kwestionowana. W badaniach TSRST nie bada się wprost sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej, ale naprężenia termiczne i temperaturę pęknięcia próbki, które zależą nie tylko od sztywności mieszanki, lecz także od wielu innych czynników, takich jak parametry lepko-sprężyste mieszanki (lepkość, sprężystość i czas relaksacji) oraz prędkość chłodzenia i historia termiczna próbki. Ponadto wiadomo, że badanie TSRST charakteryzuje się bardzo dużymi rozrzutami wyników. Można przyjąć, że badanie TSRST nie jest odpowiednie do oceny niskotemperaturowego twardnienia fizycznego mieszanek mineralno-asfaltowych.

Badania zjawiska twardnienia fizycznego prowadzono także na próbkach nieskrępowanych. W dotychczasowej literaturze podano opisy dwóch takich doświadczeń. Soenen i wsp. [12] wykazali, że istnieje bardzo istotny wpływ twardnienia fizycznego na wzrost modułów sztywności betonu asfaltowego w przedziale ujemnych wartości temperatury w badaniach próbek w metodzie jednoosiowego „ściskania-rozciągania”. Falchetto i Marasteanu [3] badali zginanie małych próbek wyciętych z betonu asfaltowego ($6,25 \times 12,5 \times 102,0$ mm), takich jak próbki lepiszczy asfaltowych używane w aparacie BBR (*Bending Beam Rheometer*) wg AASHTO T313 i otrzymali duże rozrzuty wyników, część próbek wykazywała wzrost sztywności przy izotermicznym przechowywaniu w niskich zakresach temperatury eksploatacyjnej, a część nie. O badaniach wykonanych przez autora na Politechnice Gdańskiej [5] napisano na końcu tego artykułu.

Bahia i wsp. [1] prowadzili w ostatnich latach bardzo interesujące badania w nowo skonstruowanym aparacie ATCA (*Asphalt Thermal Cracking Analyzer*), które potwierdziły istotne znaczenie twardnienia fizycznego betonu asfaltowego w odniesieniu do niskotemperaturowego zachowania się nawierzchni.

Wpływ twardnienia fizycznego mieszanek mineralno-asfaltowych na spękania niskotemperaturowe

Poglądy na wpływ twardnienia fizycznego asfaltów na spękania niskotemperaturowe są wśród badaczy zróżnicowane i przeciwstawne. Jedni utrzymują, że zjawisko to nie ma wpływu na spękania niskotemperaturowe, a inni że jest bardzo istotne i może powodować wzrost liczby spękań niskotemperaturowych. Poglądy na ten temat przechodziły ewolucję. Początkowo, gdy badania twardnienia fizycznego zostały zainicjowane na szeroką skalę w USA w programie SHRP, na początku lat 90-tych XX w., przywiązywano do niego dużą wagę. Pierwsza publikacja Superpave z 1994 r. (*Superpave Series No. 1 – SP1*) przedstawiająca nową klasyfikację użytkową asfaltów według systemu *Performance Grade* zawierała w tabeli klasyfikacyjnej badanie twardnienia fizycznego po 24 godzinach przechowywania w temperaturze badania. Nie podano żadnych wymagań względem twardnienia, ale wymagano jego raportowania jako wyniku badania. W normie klasyfikacyjnej asfaltów AASHTO M320 z 2005 r., która była wynikiem badań Superpave nie ma już zapisu o badaniu twardnienia fizycznego.

Przekonanie, że twardnienie fizyczne asfaltów wpływa na spękania niskotemperaturowe zostało wśród części badaczy nieco zachwiane przez wnioski z badań podane przez Dengrego [2] w 2000 r. Przebadał on relaksację naprężeń termicznych w próbkach lepizcza asfaltowego w niskich zakresach temperatury eksploatacyjnej i na tej podstawie wywnioskował, że w mieszance mineralno-asfaltowej proces usztywnienia asfaltu wskutek twardnienia fizycznego będzie niwelowany przez równocześnie postępującą relaksację naprężeń. Jako poparcie takiej tezy przytoczył argument, że w niskich zakresach temperatury eksploatacyjnej proces relaksacji naprężeń w asfalcie jest szybszy niż proces wzrostu sztywności wskutek twardnienia fizycznego asfaltu. Pogląd ten został potem poparty przez teoretyczną analizę przeprowadzoną przez Shenoy'a [11]. Dodatkowy wpływ na ugruntowanie poglądu o braku lub minimalnym wpływie twardnienia fizycznego asfaltów na spękania niskotemperaturowe miały nie rozstrzygające badania naprężeń termicznych w aparacie TSRST, przeprowadzone przez Romero i wsp. [10].

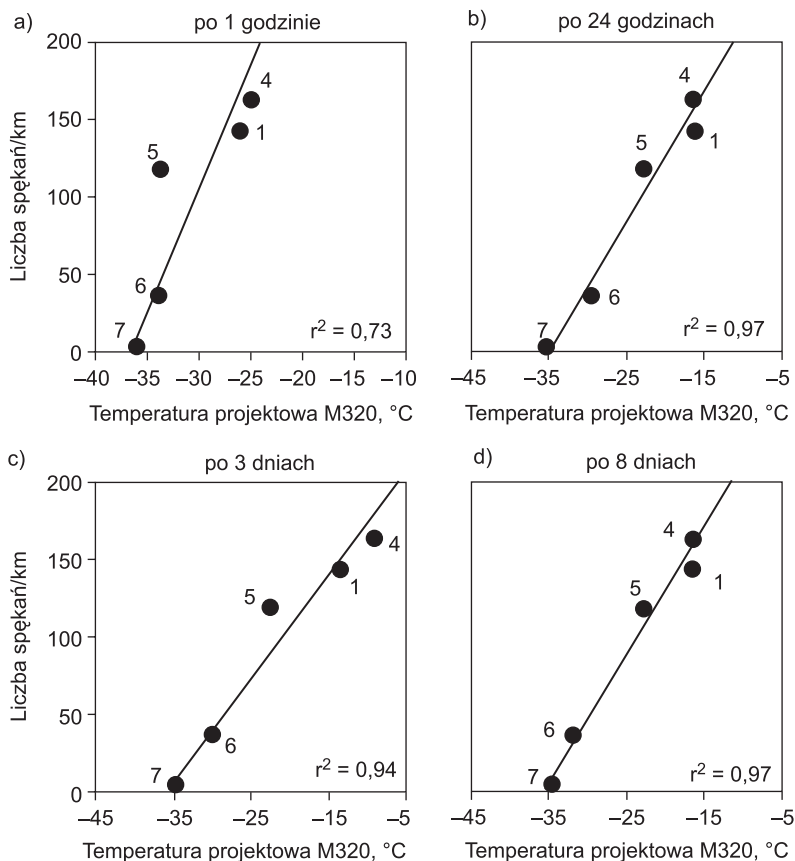
Część badaczy reprezentuje przeciwstawne poglądy i twierdzi, że twardnienie fizyczne asfaltów w niskich zakresach temperatury eksploatacyjnej jest bardzo ważnym czynnikiem powodującym wzrost liczby spękań niskotemperaturowych. Poglądy takie są reprezentowane przez badaczy kanadyjskich, z których wymienić należy zespół prof. Simona Hespera z Queens University w Kingston, Ontario. Zespół ten od wielu lat prowadzi badania związków pomiędzy twardnieniem fizycznym asfaltów i spękaniem niskotemperaturowymi nawierzchni. Zhao i Hesp [13] przeprowadzili badania związku pomiędzy twardnieniem fizycznym asfaltów a liczbą spękań niskotemperaturowych na odcinku doświadczalnym w Lamont, w prowincji Alberta w Kanadzie. Badano 7 odcinków z różnymi asfaltami, badane nawierzchnie miały 12 lat. Udowodniono, że twardnienie fizyczne asfaltów ma wyraźny wpływ na liczbę spękań niskotemperaturowych. Stwierdzono, że uwzględnienie twardnienia fizycznego asfaltów mie-

zonego po 1, 3 i 8 dniach przechowywania próbek asfaltu w warunkach izotermicznych, w temperaturze -10°C i -20°C , bardzo poprawiło korelację pomiędzy parametrami tych asfaltów uzyskanymi z badań zginania w aparacie BBR a zanotowaną intensywnością spękań.

Wybrane wyniki badań Zhao i Hespera [13] na odcinku doświadczalnym w prowincji Alberta pokazano na rys. 1, który przedstawia związki pomiędzy liczbą spękań zanotowanych na 1 km drogi, a „temperaturą projektową M320” asfaltów użytych do budowy odcinków. Przez „temperaturą projektową M320” (termin ten jest tutaj cytowany za Zhao i Hesperem [13]) należy rozumieć najniższą temperaturę nawierzchni, występującą w określonym rejonie, do jakiej może być stosowany dany asfalt. Temperaturę tę określa się według metodyki podanej w normie klasyfikacyjnej asfaltów AASHTO M320, czyli według systemu Superpave. W oryginalnej metodzie badania laboratoryjnego temperatury krytycznej, według normy czynnościowej AASHTO T313, próbki asfaltu przetrzymuje się w temperaturze badania przez 60 ± 5 minut i następnie zgina pod stałym obciążeniem w aparacie BBR (*Bending Beam Rheometer*). Zhao i Hesp [13] zmodyfikowali tę metodę w celu uwzględnienia twardnienia fizycznego i przechowywali próbki asfaltu w temperaturze -10°C , lub -20°C , przez 24h oraz 3 i 8 dni. Po tym przez 15 minut kondycjonowali próbki w temperaturze badania stosowanej w aparacie BBR. Pozostałe elementy badania i opracowania wyników były zgodne z AASHTO T313-06. Na rys. 1a podano wyniki otrzymane według procedury przechowywania próbek AASHTO T313, czyli przez 1h w temperaturze badania, bez twardnienia fizycznego. Na rys. 1b, 1c i 1d pokazano wyniki ze zmodyfikowaną procedurą przechowywania próbek, z uwzględnieniem twardnienia fizycznego, w warunkach izotermicznych w temperaturze -20°C przez 24h oraz 3 i 8 dni. Widać, że ze wzrostem „temperatury projektowej asfaltu M320” w każdym przypadku (rys. 1a-1d) wzrasta liczba spękań niskotemperaturowych nawierzchni. Jednakże korelacja pomiędzy liczbą spękań a temperaturą projektową M320 jest najniższa na próbkach badanych bez twardnienia fizycznego ($r^2 = 0,73$) i bardzo poprawia się po uwzględnieniu twardnienia fizycznego występującego w temperaturze -20°C przez 24h oraz 3 i 8 dni ($r^2 = 0,94-0,97$).

Warto zwrócić uwagę na zachowanie się odcinków 5, 6 i 7 (patrz numery na wykresach na rys. 1). Nawierzchnie na tych odcinkach zawierały asfalty o prawie identycznej „temperaturze projektowej M320” określonej bez twardnienia fizycznego (rys. 1a), równej odpowiednio $-33,8$, $-33,8$ i $-35,8^{\circ}\text{C}$, ale bardzo różniły się liczbą spękań na 1 km, które wynosiły odpowiednio: 119, 37 i 4. Po twardnieniu fizycznym przez 24 h (rys. 1b) „temperatura projektowa M320” wzrosła dla asfaltów z odcinków 5, 6 i 7 odpowiednio o ΔT równe 10,1, 1,7 i $0,8^{\circ}\text{C}$, wskutek wzrostu ich sztywności przy zginaniu. Jak widać na odcinku 5 wystąpiło najwięcej spękań – 119 na 1 km. Na odcinku tym zastosowano asfalt oksydowany o największym twardnieniu fizycznym ($\Delta T = 10,1^{\circ}\text{C}$). Na odcinku 7, gdzie asfalt prawie nie wykazywał twardnienia fizycznego ($\Delta T = 0,8^{\circ}\text{C}$) było najmniej spękań, a mianowicie 4 na 1 km.

Hesp i wsp. [4] badali także spękania niskotemperaturowe 20 odcinków nawierzchni asfaltowych w prowincji Ontario w Kanadzie, o wieku od 4 do 14 lat, i stwierdzili, że klasyfikacja asfaltów według Superpave – AASHTO M320 (*PG – Per-*



Rys. 1. Związek pomiędzy liczbą spękań a minimalną temperaturą krytyczną według AASHTO M320 po różnym czasie izotermicznego przechowywania próbek, według Zhao i Hespa [13]

formance Grade), oparta na badaniach zginania BBR po 1 godzinie izotermicznego przechowywania asfaltu w niskiej temperaturze, nie korelowała z liczbą spękań niskotemperaturowych. Również w tym przypadku wprowadzenie izotermicznego przechowywania asfaltów przez 3 dni przed badaniem w aparacie BBR zdecydowanie poprawiło korelację pomiędzy klasyfikacją asfaltu i liczbą spękań niskotemperaturowych w terenie.

W konsekwencji tych badań w prowincji Ontario w Kanadzie wprowadzono w 2007 r. nową normę oceny asfaltów drogowych (Standard LS-308). Norma ta wprowadziła ocenę twardnienia fizycznego do badania zginania w aparacie BBR. Norma LS-308 stanowi rozszerzenie amerykańskiej normy klasyfikacyjnej asfaltów AASHTO M320 o 24-godzinne przechowywanie lepiscza w niskich zakresach temperatury eksploatacyjnej. W prowincji Ontario wprowadzono także wymagania techniczne ograniczające twardnienie fizyczne asfaltów, w celu niedopuszczenia do stosowania w budowie dróg asfaltów podatnych na spękania niskotemperaturowe.

Jak widać z badań kanadyjskich, standardowa klasyfikacja właściwości użytkowych asfaltów według Superpave (AASHTO M320), która nie uwzględnia twardnienia fizycznego, może być niewystarczająca do przewidywania powstawania spękań niskotemperaturowych. Według Hespa i współpracowników [4,13] asfalty o takiej samej klasyfikacji właściwości użytkowych, na przykład PG58-28 mogą zachowywać się różnie w zależności od ich twardnienia fizycznego. Asfalty PG58-28 o dużym twardnieniu fizycznym, zastosowa-

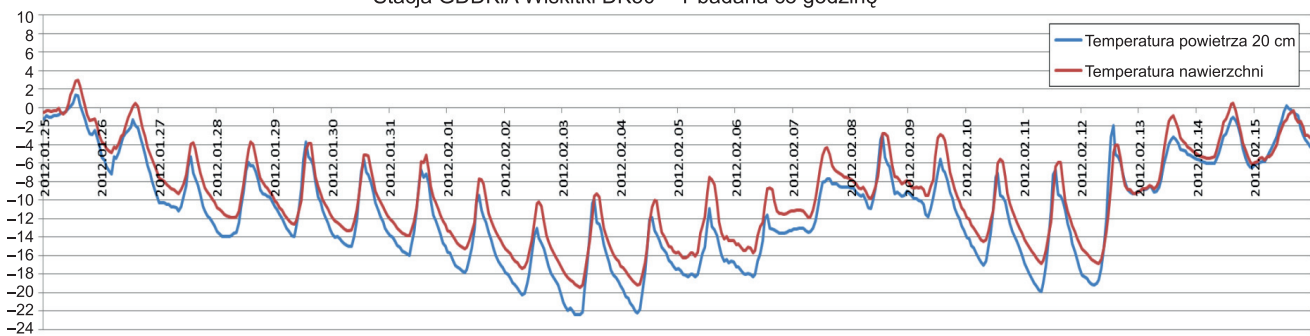
ne w terenie, gdzie minimalna zimowa temperatura jest równa -28°C , mogą spowodować, że nawierzchnie będą podatne na spękania niskotemperaturowe. Asfalty PG58-28 o małym twardnieniu fizycznym, zastosowane w takich samych warunkach klimatycznych, mogą pozwolić na wykonanie nawierzchni odpornych na spękania niskotemperaturowe. W Polsce stosujemy tradycyjną klasyfikację asfaltów opartą o penetrację. Na tej samej jednak zasadzie można powiedzieć, że na przykład asfalt A rodzaju 35/50 o dużym twardnieniu fizycznym może spowodować wystąpienie w nawierzchni większej liczby spękań niskotemperaturowych niż nominalnie taki sam asfalt B, także rodzaju 35/50, ale o mniejszym twardnieniu fizycznym.

Liczba spękań podana na rys. 3, występująca w surowym klimacie Kanady, około 150 spękań na 1 km po 12 latach eksploatacji na odcinkach 1 i 4, wydawać się może bardzo duża. Jednak, w badaniach Politechniki Gdańskiej w 2001 r. (Judycki, Dołżycki [6]) na drodze krajowej DK57, w km 13+000 – 13+500, w woj. warmińsko-mazurskim stwierdzono 16,4 spękań niskotemperaturowych na 100 m drogi. Była to maksymalna zarejestrowana liczba spękań niskotemperaturowych na 58 odcinkach dróg w woj. pomorskim, warmińsko-mazurskim i podlaskim badanych przez zespół Politechniki Gdańskiej dwukrotnie, w latach 1999 i 2005 [6,9]. W 5 przypadkach na 58 badanych odcinków dróg zanotowano liczbę spękań niskotemperaturowych większą od 9 na 100 m drogi.

Czas trwania mrozów, a intensywność spękań niskotemperaturowych nawierzchni asfaltowych

Twardnienie fizyczne asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych implikuje możliwość występowania związku pomiędzy czasem trwania mrozów a intensywnością spękań niskotemperaturowych nawierzchni. Jeżeli sztywność mieszanek mineralno-asfaltowych wzrasta w czasie ich izotermicznego przechowywania w niskich zakresach temperatury eksploatacyjnej to prawdopodobieństwo powstawania spękań niskotemperaturowych powinno być większe wtedy, gdy czas trwania mrozów jest dłuższy, przy założeniu występowania takich samych wartości niskiej temperatury. Wynika to stąd, że naprężenia termiczne przy oziębianiu warstwy asfaltowej wzrastają proporcjonalnie ze wzrostem modułu sztywności tej warstwy. Jednakże w dostępnej literaturze zarówno krajowej, jak i zagranicznej autor nie spotkał danych z obserwacji terenowych na ten temat. Stwierdzenia te należy więc obecnie traktować jako pewną hipotezę, wymagającą potwierdzenia w obserwacjach.

Jako ilustrację tego zagadnienia, na rys. 2 pokazano wykres zmian temperatury zmierzonej w lutym 2012 r. na stacji pomiarowej zlokalizowanej w pobliżu budowanej autostrady. Temperatura powietrza poniżej -16°C utrzymywała się przez 7 dni, następnie w czasie 3 dni nastąpiło lekkie ocieplenie i temperatura powietrza wzrosła do około -10°C , potem



Rys. 2. Temperatury powietrza i nawierzchni w lutym 2012 r. w pobliżu budowanej autostrady (dane ze stacji pomiarowej GDDKiA), według [7]



Fot. 1. Zdjęcia spękań niskotemperaturowych podbudowy z betonu asfaltowego o wysokim module sztywności AC WMS na autostradzie w budowie, według [7]

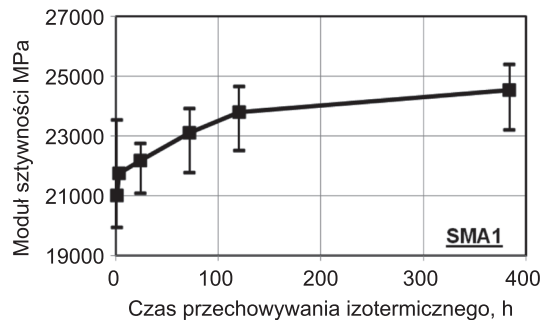
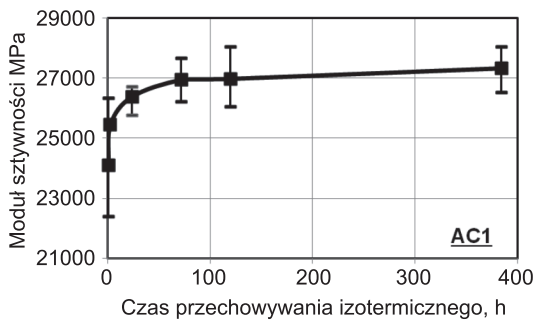
Tabela 1. Liczba spękań niskotemperaturowych na podbudowie z betonu asfaltowego o wysokim module sztywności z AC WMS w czasie budowy autostrady w lutym 2012 r. na jej trzech odcinkach, według badań Politechniki Gdańskiej [7]

Wyszczególnienie	Odcinek autostrady		
	Odcinek 1	Odcinek 2	Odcinek 3
Liczba spękań w spoinach technologicznych	16	28	15
Liczba spękań po za spoinami technologicznymi	83	22	51
Razem spękań niskotemperaturowych na odcinku	99	50	66
Średnia liczba spękań na 1 km na jezdni lewej	11	4	6
Średnia liczba spękań na 1 km jezdni prawej	9	2	3

ponownie wystąpiły kolejne 3 dni mrozów poniżej -16°C . Jak zawsze występowały wahania temperatury w ciągu doby. Minimalna temperatura powietrza w tym czasie wynosiła -22°C , a minimalna temperatura nawierzchni -19°C . Na autostradzie w budowie powstało w tym czasie bardzo dużo spękań niskotemperaturowych w podbudowie z betonu asfaltowego o wysokim module sztywności AC WMS, nie przykrytej jeszcze warstwami górnymi, co ilustruje fot. 1. Liczbę spękań podbudowy z AC WMS, określoną na podstawie badań wykonanych na tym odcinku przez Politechnikę Gdańską [7], przedstawiono w tabeli 1. W tym samym czasie popękały podbudowy i warstwy wiążące wykonane z AC WMS nie tylko na opisywanym odcinku autostrady, ale także na innych autostradach w budowie w Polsce. Przy stosunkowo małych mrozach, w zasadzie typowych w rozważanym rejonie Polski, ale trwających przez okres około 10–14 dni, gdy temperatura warstw asfaltowych obniżyła się do około -20°C , wystąpiło tak dużo spękań niskotemperaturowych (do 11 spękań na 1 km) w świeżo wykonanych warstwach podbudowy (tabela 1).

Badania niskotemperaturowego twardnienia fizycznego mieszanek mineralno-asfaltowych na Politechnice Gdańskiej

Ze względu na ograniczoną objętość artykułu badania Politechniki Gdańskiej w zakresie twardnienia fizycznego mieszanek mineralno-asfaltowych zostaną tylko zasygnalizowane. Rozpoczęły się one w 2001 r. Badano 6 typów mieszanek, w tym 3 betony asfaltowe i 3 mieszanki SMA, wszystkie przeznaczone do warstw ścieralnych. Próbkę przechowywano przez 1, 3, 24, 72, 120 i 384 godziny w warunkach izotermicznych w -20°C . Badano moduł sztywności w aparacie NAT i wytrzymałość na rozciąganie pośrednie w temperaturze -20°C . Badano również odwracalność procesu twardnienia fizycz-



Rys. 3. Przykładowe wyniki badań niskotemperaturowego twardnienia fizycznego mieszanek mineralno-asfaltowych wykonanych na Politechnice Gdańskiej, według J. Judyckiego [5]

nego i wpływ zawartości wolnych przestrzeni na ten proces. W każdym przypadku badano od 4 do 5 próbek jednorodnych. Część wyników opublikowano w artykule [5]. Rys. 3 pokazuje wzrost sztywności wybranego betonu asfaltowego (oznaczonego na rysunku AC1) i wybranej mieszanki mastyksowo-grysowej typu SMA (oznaczonej SMA1), ze wzrostem czasu izotermicznego przechowywania w temperaturze -20°C . Na rys. 3 pokazano także rozrzuty wyników badań. Widać bardzo wyraźny proces twardnienia fizycznego. Moduły rosną na początku procesu szybko, a potem coraz wolniej. Maksymalny zanotowany wzrost modułu był rzędu 20%. Badane materiały różniły się między sobą składem mieszanki mineralnej, a także rodzajem asfaltów; stosowano asfalty drogowe niemodyfikowane i modyfikowane o różnej twardości. Stwierdzono, że twardnienie fizyczne zależy od typu mieszanek (AC i SMA) i ich składu oraz zagęszczenia.

Podsumowanie

Proces twardnienia fizycznego objawia się wzrostem sztywności asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych przechowywanych w warunkach izotermicznych, zwłaszcza w niskich zakresach temperatury eksploatacyjnej.

1. Twardnienie fizyczne asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych, mało znane w Polsce, jest przedmiotem badań naukowych w USA, Europie i Kanadzie. Włączyła się do tego Politechnika Gdańska. Zjawisko to, jego przyczyny i jego wpływ na spękania niskotemperaturowe nawierzchni, nie jest do końca poznane i jest wciąż przedmiotem badań.

2. Za prawdopodobne przyczyny twardnienia fizycznego asfaltów uważa się zmniejszenie lub zanik wolnych objętości cząsteczkowych, strukturyzację cząsteczkową, agregację asfaltenów oraz krystalizację frakcji parafinowych. W tym ostatnim punkcie zdania specjalistów są podzielone.

3. Wśród czynników wpływających na podatność asfaltów na twardnienie fizyczne wymieniane są następujące czynniki: skład chemiczny asfaltu, źródło ropy naftowej z jakiej wyprodukowano asfalt, technologia produkcji w rafinerii (procesy oksydacji, modyfikacji, stosowane dodatki). Zależności te nie są jeszcze wyraźnie określone i są dalej przedmiotem badań.

4. Badania twardnienia fizycznego mieszanek mineralno-asfaltowych są dotychczas nieliczne. Z badań Politechniki Gdańskiej wynika, że twardnienie fizyczne betonu asfaltowego i SMA wyraźnie występuje i wzrost sztywności w tempera-

turze -20°C może sięgać przy długotrwałym przechowywaniu w warunkach izotermicznych do 20%. Na twardnienie fizyczne mieszanek mineralno-asfaltowych wpływa typ mieszanki (AC lub SMA), jej skład i zagęszczenie.

5. Są podstawy do przypuszczenia, że asfalty wykazujące duże twardnienie fizyczne powodują, że nawierzchnie

z ich użyciem są bardziej podatne na spękania niskotemperaturowe. Jeżeli dalsze badania to w pełni potwierdzą, to twardnienie fizyczne asfaltów może stać się dobrą miarą do eliminowania z zastosowań w budowie dróg asfaltów o niekorzystnych cechach.

Bibliografia

- [1] H.U. Bahia, H. Tabatabaee, R. Valasquez R., *Importance of Bitumen Physical Hardening for Thermal Stresses Buildup and Relaxation in Asphalt*, 5th Euroasphalt and Eurobitume Congress, Istanbul, 13-15 June, 2012
- [2] R. Dengre, *Effect of Physical Hardening on Stress Relaxation Behaviour of Asphalt Pavements*, Proceedings of Euroasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona, 2000, pp. 220 – 227
- [3] A.C. Falchetto, M.O. Marasteanu, *Physical Hardening: From Binders to Mixtures*, International Journal of Roads and Airports, vol.1, No.1, 2011, pp. 18-34
- [4] S.A.M. Hesp, S.N. Genin, D. Scafe, H.F. Shurvell, S. Subramani, *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, Vol. 54, 2009, pp. 99-126
- [5] J. Judycki, *Influence of Low-Temperature Physical Hardening on Stiffness and Tensile Strength of Asphalt Concrete and Stone Mastic Asphalt*, The paper submitted to the 93rd Annual Transportation Research Board Meeting, January, 12-16, 2014, Washington D.C.
- [6] J. Judycki, B. Dołycki, *Badania terenowe i laboratoryjne spękań poprzecznych w nawierzchniach asfaltowych*, Politechnika Gdańska, Raport badawczy, Praca wykonana na zlecenie GDDKiA, Gdańsk, 1999
- [7] J. Judycki, B. Dołycki, P. Jaskuła, *Wpływ zastosowania betonu asfaltowego o wysokim module sztywności na spękania niskotemperaturowe nawierzchni*, XXVII Seminarium Techniczne PSWNA, „Technologia i prawo – wspólna droga do jakości”, 17-19 października 2012, Warszawa – Mierzeszyn
- [8] Lu X., U. Isacsson, *Laboratory Study on the Low Temperature Physical Hardening of Conventional and Polymer Modified Bitumens*, Construction and Building Materials, No. 14, 2000, pp. 79-88
- [9] M. Pszczoła, *Spękania niskotemperaturowe warstw asfaltowych nawierzchni*, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, 2006
- [10] P. Romero, J. Youtcheff, K. Stuart., *Low-Temperature Physical Hardening of Hot-Mix Asphalt*, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 1661, 1999, pp. 22-26
- [11] A. Shenoy, *Stress Relaxation can Perturb and Prevent Physical Hardening in a Constrained Binder at Low Temperatures*, Road Materials and Pavement Design, Vol. 3, No. 1/2002, pp. 87-94
- [12] H. Soenen, J. Ekblad, Lu X., P. Redelius, *Isothermal Hardening in Bitumen and in Asphalt Mixes*, Proceedings of the 3rd Euroasphalt and Eurobitume Congress, Vienna, May, 2004, vol. 2, pp. 1364-1375
- [13] M.O. Zhao, S.A.M. Hesp, *Performance Grading of the Lamont, Alberta C-SHRP Pavement Trial Binders*, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 7, No. 3, September, 2006, pp. 199-211