



MAREK IWAŃSKI

Politechnika Świętokrzyska
miwanski@tu.kielce.pl

Wpływ rodzaju kruszywa na bezpieczeństwo asfaltowych nawierzchni drogowych

Nawierzchnie drogowe oprócz zapewnienia trwałości na wymaganym poziomie, czyli odporności na oddziaływanie czynników klimatycznych, jak również obciążenia ruchem pojazdów, w założonym okresie pracy powinny charakteryzować się także odpowiednimi parametrami eksploatacyjnymi. Do niedawna zaliczano do nich przede wszystkim szorstkość, równość podłużną i poprzeczną, w przypadku których opracowano odpowiednie wymagania. Zapewniają one zarówno komfort jazdy, jak również bezpieczeństwo ruchu drogowego. Obecnie coraz częściej jako bardzo istotny parametr eksploatacyjny rozpatruje się barwę nawierzchni asfaltowej, która w istotny sposób wpływa na bezpieczeństwo ruchu pojazdów w warunkach nocnych, a zwłaszcza w czasie opadów deszczu. Odpowiednia barwa przeciwdziała zjawisku oddziaływania nawierzchni jako zwierciadła i tym samym powstawaniu zjawiska olśniewania kierowców przez reflektory pojazdów jadących z przeciwnego kierunku.

Właściwości paramentów eksploatacyjnych nawierzchni asfaltowej uzależnione są od technologii wykonania, jak również od składu ramowego mieszanki mineralno-asfaltowej. Do technologii zapewniających rozbudowaną teksturę nawierzchni asfaltowej, a tym samym wpływających na szorstkość nawierzchni, zalicza się mieszankę mastykowo-grysową SMA. Doświadczenia praktyczne pokazują, że jej zastosowanie zapewnia niezbędną szorstkość w okresie pierwszych lat eksploatacji. W dłuższym okresie eksploatacyjnym szorstkość nawierzchni uwarunkowana jest mikrostrukturą, która związana jest z rodzajem zastosowanego kruszywa w mieszance mineralno-asfaltowej. Istnieje więc ścisły związek pomiędzy bezpieczeństwem ruchu drogowego a użytym kruszywem, a właściwie jego rodzajem, który uwarunkowany jest właściwościami mechanicznymi.

Kruszywo do mieszanek mineralno-asfaltowych pozyskiwane jest z różnego rodzaju skał, które formowały się w epokach geologicznych. Tworzyły się one z osadów organicznych, powstawały w czasie erupcji wulkanów oraz podlegały procesom geologicznym. W konsekwencji kruszywa zawierają różnego rodzaju minerały, które nie tylko decydują o ich właściwościach fizyko mechanicznych, ale również i barwie [9]. W związku z tym dobierając odpowiedni rodzaj kruszywa można wpływać na barwę nawierzchni asfaltowej, która wcale nie musi być czarna.

Rodzaj kruszywa a szorstkość nawierzchni asfaltowej

Odpowiednio dobierając rodzaj kruszywa w mieszance mineralno-asfaltowej można kształtować parametry eksplo-

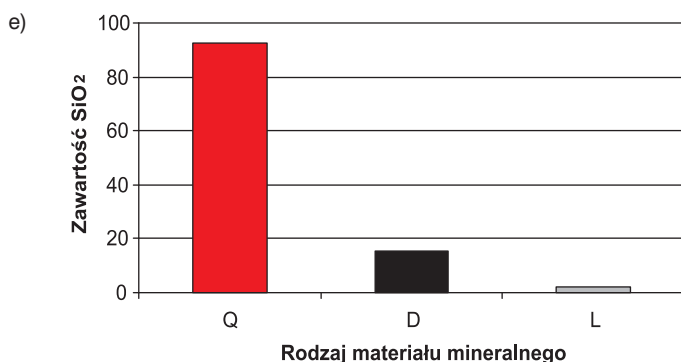
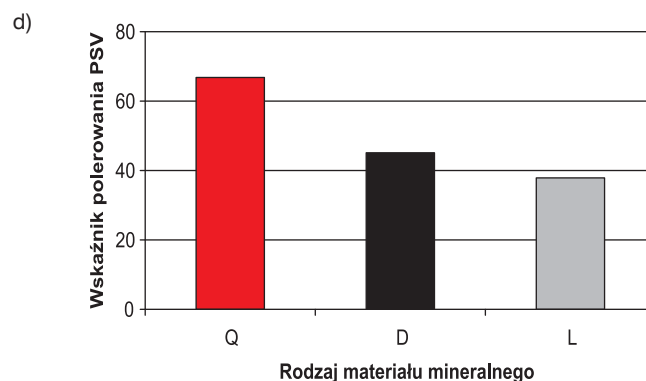
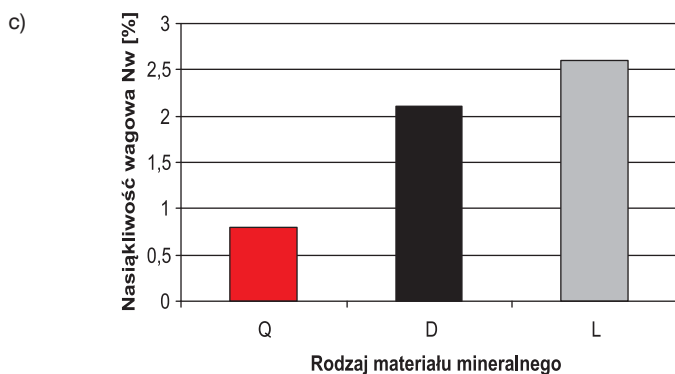
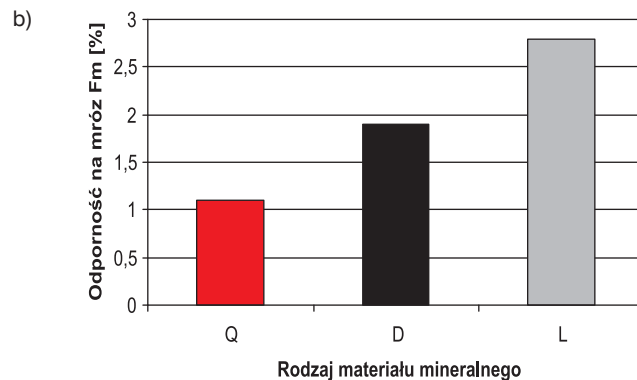
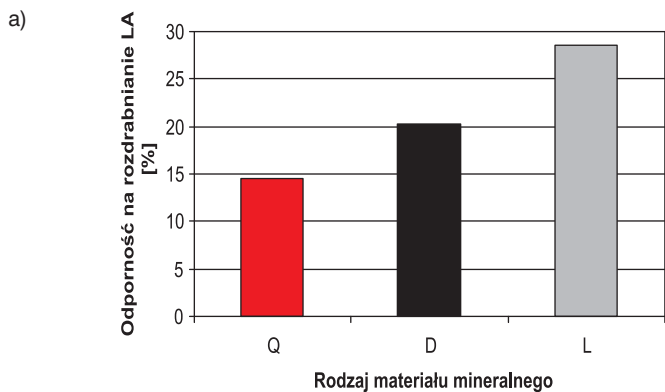
atacyjne wykonanej z niej nawierzchni asfaltowej w aspekcie poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego. W celu oceny wpływu rodzaju kruszywa na zachowanie się nawierzchni asfaltowej w okresie jej eksploatacji zaprojektowano mieszankę mineralną zawierającą kruszywo z piaskowca kwarcytowego (Q), dolomitu (D) oraz wapienia dewońskiego (L). Wszystkie kruszywa pochodzą z regionu świętokrzyskiego.

Charakterystyczne właściwości zastosowanych materiałów mineralnych przedstawiono na rysunku 1.

Kruszywo z piaskowca kwarcytowego charakteryzuje się niskim wskaźnikiem LA, co świadczy o dużej odporności na proces rozdrabniania. Zaliczane jest do grupy kruszyw o jednej z największych odporności na rozdrabnianie wg metodyki LA w warunkach polskich. Zastosowanie tego kruszywa w nawierzchni wykonanej z mieszanki SMA powinno zapewnić dużą odporność na oddziaływanie obciążenia pochodzącego od ruchu pojazdów oraz wymaganą szorstkość nawierzchni asfaltowej [3, 4, 6, 7]. Kruszywo dolomitowe jest mniej odporne na rozdrabnianie niż kruszywo uzyskane z piaskowca kwarcytowego. Wskaźnik LA charakteryzujący to kruszywo osiąga wartość 20,2%. Tym samym jest ono na pograniczu pomiędzy kruszywami twardymi stosowanymi do warstw ścieralnych nawierzchni dróg krajowych obciążonych ruchem pojazdów KR4 do KR6 (drogi typu autostrada) a kruszywem miękkim stosowanym na drogach regionalnych o obciążeniu ruchem KR3 i mniejszym. Najmniej odporne na proces rozdrabniania LA jest kruszywo z wapienia dewońskiego, które jest stosowane głównie do warstw ścieralnych nawierzchni dróg o lokalnym znaczeniu obciążonych ruchem KR2 i KR1.

Wartości wskaźnika odporności na polerowanie PSV korelują z odpornością na rozdrabnianie kruszywa wg metodyki LA. Najbardziej odporne na polerowanie jest kruszywo z piaskowca kwarcytowego, w którym wskaźnik PSV osiąga wartość 67. Jest to kruszywo spośród kruszyw naturalnych występujące w naszym kraju najbardziej odporne na polerowanie, gwarantujące zachowanie w długim okresie eksploatacji nawierzchni asfaltowej odpowiedniej szorstkości. Kruszywo dolomitowe zastosowane jako samodzielne w mieszance mineralnej SMA charakteryzowane przez PSV o wartości 45 nie gwarantuje zapewnienia szorstkości nawierzchni w czasie jej eksploatacji. Kruszywo z wapienia dewońskiego charakteryzuje się mniejszą wartością wskaźnika PSV ($PSV = 38$) niż kruszywo dolomitowe.

Kruszywo z piaskowca kwarcytowego, dzięki niskiej nasiąkliwości oraz dużej odporności na oddziaływanie wody i mrozu, będzie odporne w nawierzchni asfaltowej na oddziaływanie destrukcyjnych czynników jakimi są woda oraz woda i mróz. Mniej odporne na oddziaływanie obu destrukcyjnych czynników klimatycznych jest kruszywo dolomitowe. Kruszywo z wapienia dewońskiego charakteryzuje się



Rys. 1. Właściwości materiałów mineralnych: a) odporność na rozdrobnienie LA, b) odporność na oddziaływanie mrozu, c) nasiąkliwość wagowa Nw, d) wskaźnik polerowalności PSV, e) zawartość krzemionki w kruszywie SiO₂ – Q piaskowiec kwarcytowy, D dolomit, L dolomit dewoński

największą nasiąkliwością oraz małą mrozoodpornością. Jest ono także mniej odporne na oddziaływanie wody oraz wody i mrozu.

Właściwości badanych kruszyw związane są ze składem mineralogicznym skały, z której je pozyskano. Szczególnie istotna jest zawartość krzemionki SiO₂, która decyduje o parametrach mechanicznych kruszywa. Kruszywo z piaskowca kwarcytowego zawiera 92,5% krzemionki w składzie mineralogicznym skały. Z tego powodu charakteryzuje się dużą odpornością na proces rozdrabniania LA oraz polerowanie PSV. Skała dolomitowa zawiera znacznie mniej krzemionki niż piaskowiec kwarcytowy, dlatego też jej odporność na rozdrabnianie LA i polerowanie PSV jest proporcjonalnie mniejsza niż kruszywa z piaskowca kwarcytowego. Wapień dewoński zawiera tylko śladowe ilości krzemionki. Z uwagi na to charakteryzuje się najmniejszą odpornością na rozdrabnianie i polerowanie.

Krzemionka SiO₂ ma bardzo korzystny wpływ na parametry mechaniczne kruszywa, ale w bardzo niekorzystny spo-

sób wpływa na powinowactwo tego kruszywa z asfaltem. Im więcej krzemionki występuje w kruszywie, tym gorsze jego powinowactwo z asfaltem. Wykonana z udziałem piaskowca kwarcytowego nawierzchnia asfaltowa może nie być odporna na oddziaływanie wody oraz mrozu [2]. Natomiast kruszywo dolomitowe oraz z wapienia dewońskiego charakteryzuje się z reguły bardzo dobrym powinowactwem z asfaltem [2].

Zastosowanie w mieszance mineralnej kruszyw o różnicowanej odporności na rozdrobnienie oraz polerowanie przy użyciu jako zasadniczego kruszywa z piaskowca kwarcytowego powinno zapewnić wymaganą szorstkość nawierzchni asfaltowej w długim okresie eksploatacji. Dodatek kruszywa dolomitowego i z wapienia dewońskiego będzie wpływał korzystnie na adhezję asfaltu do całej mieszanki mineralnej, w tym do kruszywa z piaskowca kwarcytowego.

Należy zaznaczyć, że przedstawione w artykule badania zapoczątkowano prawie dwadzieścia lat temu a mieszankę mineralno-asfaltową zaprojektowano wg obowiązującej w tym okresie normy PN-S 96025:2000. W związku z tym, występu-

ją pewne odstępstwa od obecnie obowiązujących wymagań dla kruszyw wykorzystywanych do mieszanek mineralno-asfaltowych. Należy również zaznaczyć, że w stosunku do wymagań wówczas obowiązującej normy dokonano pewnych odstępstw co do zastosowania rodzaju kruszywa np. z wapienia dewońskiego. Dokonano tego w sposób celowy, w uzgodnieniu z zarządcą drogi, w celu osiągnięcia założonego efektu w postaci zapewnienia odpowiedniej szorstkości nawierzchni asfaltowej w długim okresie eksploatacji. Skład ramowy zaprojektowanej mieszanki mineralno-asfaltowej zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. **Udział materiałów mineralnych w mieszance SMA 0/12,8**

Mieszanka kwarcytowa		
Składnik		Udział [%]
Mączka wapienna		10
Kruszywo drobne wapienne 0/4		12
Kruszywo dolomitowe 2/6		15
Kruszywo z piaskowca kwarcytowego		
– frakcja 2/6,3		10
– frakcja 6,3/12,8		53
Razem		100

Mieszanka SMA w zakresie właściwości fizyko-mechanicznych spełniała wymagania normowe.

W związku z tym, że w mieszance mineralnej zastosowano dużą ilość kruszywa pochodzącego z piaskowca kwarcytowego, charakteryzującego się małym powinowactwem z asfaltem, niezbędne było zastosowanie środka adhezyjnego. Zastosowano dwa jego rodzaje: środek adhezyjny typu aminy kwasów tłuszczowych (A) w ilości 0,3% m/m w stosunku do ilości asfaltu oraz mineralny środek adhezyjny – wapno hydratyzowane (HL), zamiennie w mączce wapiennej w ilości 30% mm. Wykonano dwa rodzaje nawierzchni asfaltowej różniące się dodatkowo rodzajem środka adhezyjnego

Z mieszanki SMA wykonano nawierzchnię na jednej z ulic w Kielcach usytuowanej w głównym ciągu komunikacyjnym przebiegającym przez miasto. Obciążenie ruchem nawierzchni

ni wynosiło KR4. Przez okres 12 lat od chwili jej wykonania do 2011 roku była poddana stałym obserwacjom.

Szczególną uwagę w czasie badania powierzchni warstw ścieralnej SMA zwracano na wpływ czynników klimatycznych, a zwłaszcza oddziaływanie wody i mrozu w aspekcie zastosowanego rodzaju środka adhezyjnego. W tym celu wyróżniono sześć typów uszkodzeń nawierzchni, które mogą być powodowane oddziaływaniem czynników klimatycznych oraz składem mieszanki mineralno-asfaltowej z określonym rodzajem środka adhezyjnego, co zestawiono w tabeli 2.

Pomiary wykonywano każdego roku, lecz z uwagi na fakt występowania bardzo małego zróżnicowania w stanie powierzchniowym nawierzchni zaprezentowano ich wyniki w cyklu dwuletnim.

Analiza uzyskanych wyników pomiarów stanu powierzchniowego w aspekcie odporności na oddziaływanie wody i mrozu nawierzchni SMA pokazuje, że zastosowane środki adhezyjne (wapno hydratyzowane, amina kwasów tłuszczowych) skutecznie spełniają swoje zadanie. W okresie 7 lat eksploatacji na powierzchni warstwy ścieralnej SMA nie powstały żądane typy uszkodzenia spowodowane przez oddziaływanie wody, względnie mrozu. Dopiero w 8 roku eksploatacji na warstwie ścieralnej SMA wykonanej z dodatkiem aminy kwasu tłuszczowego (sekcja II) wystąpiły nieliczne ubytki ziaren kruszywa, zwłaszcza grubszych frakcji.

Istotnym elementem badań była ocena parametrów eksploatacyjnych nawierzchni asfaltowej, których wybrane rodzaje przedstawiono na rysunku 2.

Na podstawie analizy charakterystyk przedstawionych na rysunku 2 można stwierdzić, że zastosowanie właściwego rodzaju kruszywa oraz wybór odpowiedniej technologii wykonania nawierzchni asfaltowej z mieszanki SMA zapewnił dobrą odporność nawierzchni na odkształcenia w okresie dwunastu lat eksploatacji przy obciążeniu nawierzchni ruchem KR4, a w ostatnich latach KR5. Głębokości kolein są poniżej 4 mm. Nawierzchnia zgodnie z klasyfikacją wg SOSN znajduje się w klasie A. Głębokość tekstury mierzona za pomocą piasku kalibrowanego [10] zwiększała się w czasie. Jak przedstawiono w tabeli 2, wzrost tego parametru nie wynikał z uszkodzeń wodo- i mrozowych, lecz był konsekwencją niejednorodnego ścierania i polerowania się ziaren mieszanki mineralnej. Rozbudowa tekstury nawierzchni asfaltowej

w czasie jej eksploatacji koreluje ze wzrostem wartości jej szorstkości charakteryzowanej przez wskaźnik HP. Niestety do dziś nie został opracowany wymóg dotyczący zależności pomiędzy głębokością tekstury a rodzajem nawierzchni asfaltowej w aspekcie dopuszczalnej prędkości ruchu. Kryterium jakie sformułowano w tym zakresie, przedstawione w tabeli 3, opracowane zostało prawie czterdzieści lat temu [8].

Zgodnie z tym kryterium, tekstura nawierzchni asfaltowej charakteryzuje się w początkowym okresie eksploatacji teksturą średnią a następnie grubą, którym odpowiada dopuszczalna prędkość ruchu w zakresie od 80 km/h a nawet ponad 120 km/h.

Tabela 2. **Uszkodzenia powierzchniowe nawierzchni SMA w czasie eksploatacji**

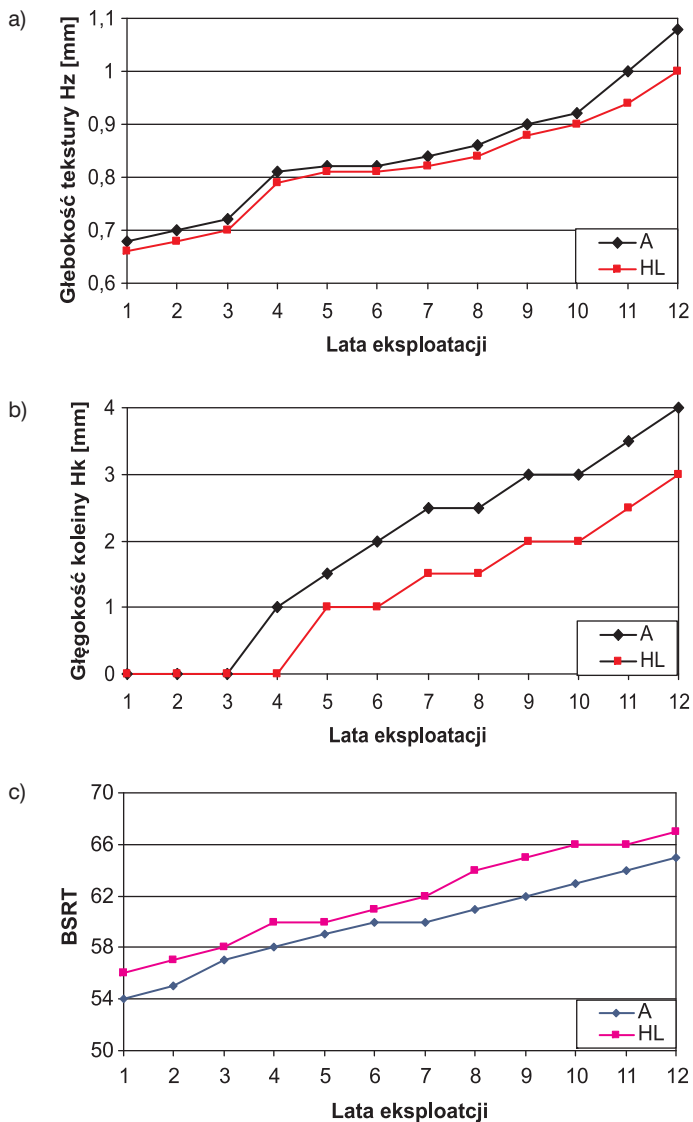
Lp.	Rodzaj uszkodzenia	Lata eksploatacji											
		2		4		6		8		10		12	
		Rodzaj środka adhezyjnego											
		HL	A	HL	A	HL	A	HL	A	HL	A	HL	A
1	Ubytki ziaren kruszywa	–	–	–	–	–	–	–	N	N	N	N	N
2	Ubytki mastyksu	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	N
3	Spękania niskotemperaturowe	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4	Spękania zmęczeniowe	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5	Spękania siatkowe	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
6	Spękania podłużne	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
7	Spękania poprzeczne	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Oznaczenia:

HL – wapno hydratyzowane, A – aminy kwasów tłuszczowych,

– brak występowania uszkodzenia,

N – nieliczne pojedyncze uszkodzenia,



Rys. 2. Wybrane charakterystyki powierzchniowe nawierzchni asfaltowej: a) głębokość tekstury, b) głębokość koleiny, c) szorstkość nawierzchni – wskaźnik BSRT. HL – wapno hydratyzowane, A – aminy kwasów tłuszczowych

Tabela 3. Kryterium dopuszczalnej prędkości ruchu w aspekcie głębokości tekstury [8]

Głębokość tekstury [mm]	Ocena nawierzchni
$HP \leq 0,2$	Nawierzchnie o teksturze bardzo drobnej – nie powinny być dopuszczone do ruchu
$0,2 < HP \leq 0,4$	Nawierzchnie o teksturze drobnej – nawierzchnie, na których prędkość jazdy nie przekracza 80 km/h
$0,4 < HP \leq 0,8$	Nawierzchnia o teksturze średniej – są to nawierzchnie normalne, na których prędkość jazdy zawiera się w granicach 80-120 km/h
$0,8 < HP \leq 1,2$	Nawierzchnie o teksturze grubej – nawierzchnie, na których utrzymuje się prędkość jazdy powyżej 120 km/h
$HP > 1,2$	Nawierzchnie o teksturze bardzo grubej – stosowane są w przypadkach specjalnych, np. w strefach niebezpiecznych, w których prędkości są bardzo duże, w strefach czasowego oblodzenia

Zgodnie z wymaganiami obowiązującymi w Wielkiej Brytanii, w początkowym okresie nawierzchnia asfaltowa o wskaźniku BSRT na poziomie 55 charakteryzuje się szorstkością zadawalającą [5]. Przy wzroście wskaźnika w czasie eksploatacji do wartości 65, szorstkość nawierzchni asfaltowej uznawana jest za dobrą.

Dodatkowo można stwierdzić, że wapno hydratyzowane użyte jako środek adhezyjny okazało się równie skuteczne, a jego efektywność jest nawet większa niż aminów kwasu tłuszczowego. Należy też zaznaczyć, że zastosowanie wapna przyczyniło się do rozjaśnienia barwy nawierzchni w początkowym okresie eksploatacji nawierzchni.

Wpływ kruszywa na barwę nawierzchni asfaltowej

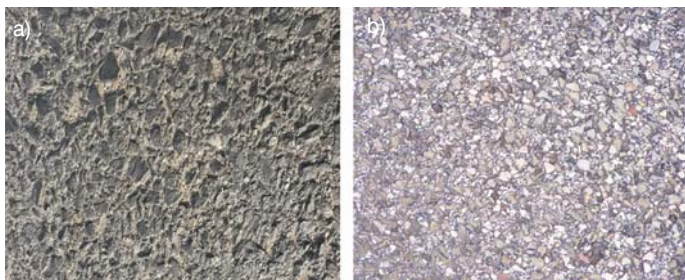
Bardzo istotnym parametrem nawierzchni drogowej jest jej barwa, która ma istotny wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego, zwłaszcza w porze nocnej. Dodatkową zaletą jasnej nawierzchni jest zmniejszenie wymaganej ilości energii elektrycznej potrzebnej do oświetlenia niewralgicznych miejsc drogi takich jak np. skrzyżowania [1]. Nawierzchnie wykonywane z betonu cementowego, ze względu na rodzaj stosowanego materiału są barwy jasnej. Mniej korzystnie przedstawia się sytuacja w przypadku nawierzchni asfaltowych ze względu na barwę lepiszcza. Jednak czarna nawierzchnia asfaltowa nie musi rzeczywiście być tak samo o barwie zdecydowanie czarnej. Na barwę oprócz koloru lepiszcza asfaltowego wpływ ma również kolor kruszywa zastosowanego w mieszance mineralno-asfaltowej, który może występować w przekroju od czarnego do barwy jasnej. Dwa skrajne przypadki kruszywa w aspekcie barwy, tj. czarnej – bazaltu oraz jasnej – z piaskowca kwarcytowego przedstawiono na fotografii 1.



Fot. 1. Barwa kruszywa w aspekcie rodzaju skały; a) piaskowiec kwarcytowy, b) bazalt

Barwa zastosowanego kruszywa w sposób jednoznaczny przekłada się na barwę nawierzchni asfaltowej. Widok tekstury nawierzchni asfaltowej w aspekcie zastosowanego kruszywa przedstawiono na fotografii 2.

Na podstawie analizy przedstawionych tekstur nawierzchni asfaltowych można stwierdzić, że barwa jej jednoznacznie uwarunkowana jest rodzajem kruszywa. W przypadku zastosowania kruszywa bazaltowego jest ona czarna. Natomiast kiedy zastosowano kruszywa jasne z piaskowca kwarcytowego to dzięki takiej barwie kruszywa (piaskowiec kwarcytowy),



Fot. 2. Barwa tekstury nawierzchni asfaltowej w aspekcie rodzaju kruszywa, a) bazalt, b) piaskowiec kwarcytowy i dolomit



Fot. 3 Barwa nawierzchni asfaltowej; a) ciemna (kruszywo bazaltowe w mma), b) jasna (kruszywo z piaskowca kwarcytowego w mma)

niezależnie od tego, że otoczona czarnym mastyksem barwa nawierzchni jest jaśniejsza (fot. 3).

Barwę nawierzchni asfaltowej w warunkach nocnych można oceniać na podstawie współczynnika odbłasku R_L ($mcd\ m^{-2}lx^{-1}$). Niezbędne jest opracowanie odpowiednich wymagań w tym zakresie, które będą odzwierciedlały krajowe uwarunkowania.

Należy stwierdzić, że baza kruszyw jasnych spełniających obecne wymagania w zakresie możliwości zastosowania do

mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych na warstwy ścieralne nawierzchni obciążonych ruchem większym od KR2 jest ograniczona. W związku z tym, trzeba zastanowić się, czy można zastosować ograniczonego ilościowo dodatku kruszywa jasnego, np. dolomitowego, które nie spełniając obecnych wymagań w zakresie odporności na polerowanie charakteryzowanej przez współczynnik PSV natomiast zapewni uzyskanie wymaganych charakterystyk normatywnych mieszanki mineralno-asfaltowej. Zastosowanie tego rodzaju kruszywa spowoduje nie tylko rozjaśnienie ciemnej barwy nawierzchni asfaltowej, ale również wpłynie na poprawę adhezji mieszanki mineralnej i lepizsca. Taką możliwość zapewniała norma PN-S-96025 z 2000 roku.

Podsumowanie

Na podstawie dokonanej analizy zaprezentowanych wyników badań można stwierdzić:

- rodzaj kruszywa, a w zasadzie kompozycja różnego rodzaju kruszyw w mieszance mineralno-asfaltowej, odgrywa istotną rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa ruchu drogowego na nawierzchniach asfaltowych,
- stosowanie kruszywa o jasnej barwie wpływa na poprawę warunków ruchu pojazdów w czasie nocy, a zawłaszcza w przypadku opadów atmosferycznych,
- projektując mieszankę mineralną można w odpowiedni sposób kształtować teksturę nawierzchni asfaltowej i zapewniać jej wymaganą szorstkość, jeden z podstawowych parametrów bezpieczeństwa ruchu drogowego,
- do rozważenia jest możliwość stosowania w ograniczonej ilości kruszywa o barwie jasnej w mieszance mineralnej, w celu zapewnienia odpowiednich parametrów nawierzchni, nawet w przypadku nie spełniania przez to kruszywo wymaganych obecnie parametrów, jak np. wskaźnika PSV.

Bibliografia

- [1] Golik W.: *Obstacle visibility at stationary road lighting*. 1st International Conference "Modern Technologies in Highway Engineering". Poznań, 1998, pp. 337-347
- [2] Iwański M.: *Właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej a rodzaj kruszywa*. Drogownictwo Nr 6, Warszawa, 2004, s.185-195.
- [3] Iwański M.: *Wpływ kruszywa kwarcytowego na właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni asfaltowej*. Pięćdziesiąta Jubileuszowa Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB "Krynica 2004". Warszawa-Krynica 12-17 września 2004, s. 153-160.
- [4] Iwański M., Ozimina D. *Ocena wpływu kruszywa kwarcytowego na właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni asfaltowej*. Trybologia Nr 6 (204), 2005, s. 85-101.
- [5] PN-EN 13036-4:2004 (U) „Drogi samochodowe i lotniskowe – Metody badań – Część 4: Metoda pomiaru oporów poślizgu/poślizgnięcia na powierzchni: próba wahadła”
- [6] Sybilski D., Mechowski T.: *Właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni a technologia wykonania warstwy ścieralnej*. Prace IBDiM Nr 3-4, Warszawa, 1998, s.109-143,
- [7] Sybilski D., Mechowski T.: *Ocena trwałości mieszanek mineralno-asfaltowych z różnymi kruszywami*. Prace IBDiM Nr 3-4, Warszawa, 1998, s.63-107
- [8] Wojdanowicz St.: *Ocena szorstkości nawierzchni za pomocą piasku kalibrowanego*. Prace IBDiM Nr 4. Warszawa, 1977, s. 81-84
- [9] Zawadzki J.: *Odporność na polerowanie się gryków kamiennych w nawierzchniach drogowych*. Prace IBDiM Nr 2, Warszawa, 1978, s. 5-69
- [10] Instrukcja pomiaru tekstury za pomocą piasku kalibrowanego. Prace IBDiM Nr 4. Warszawa, 1977, s.85-91