



CEZARY SZYDŁOWSKI

Politechnika Gdańska
cezary.szydowski@
willis.pg.gda.pl



JÓZEF JUDYCKI

Politechnika Gdańska
jozef.judycki@willis.pg.
gda.pl

Badania parametrów mechaniki pękania betonów asfaltowych konwencjonalnych i o wysokim module sztywności

Spękania warstw asfaltowych są jednymi z najczęściej pojawiających się uszkodzeń nawierzchni. O odporności mieszanki mineralno-asfaltowej na spękania decydują jej cechy mechaniczne, które należy dobrze rozpoznać, aby wbudować w nawierzchnię mieszankę zapewniającą odpowiednią trwałość konstrukcji nawierzchni. W niniejszym artykule przedstawiono przegląd literatury mechaniki pękania mieszanek mineralno-asfaltowych (mma), podstawy

teoretyczne wyznaczania parametrów mechaniki pękania oraz przeprowadzono badania laboratoryjne parametrów mechaniki pękania betonów asfaltowych AC i AC WMS. Metody badawcze mechaniki pękania nie były dotychczas stosowane w Polsce w odniesieniu do mieszanek mineralno-asfaltowych. Są obecnie w tym zakresie coraz szerzej stosowane przez badaczy na świecie. Mają duży potencjał wyjaśnienia mechanizmu spękań i mogą być przydatne w ograniczeniu liczby spękań warstw asfaltowych nawierzchni.

Przegląd literatury

Proces powstawania spękania w warstwach asfaltowych można podzielić na dwa etapy: inicjację i propagację. Mechanika pękania (ang. *fracture mechanics*) ma zastosowanie do oceny procesu propagacji spękania. W oparciu o koncepcję energetyczną, na podstawie bilansu energetycznego ciała sprężystego ze szczeliną, w latach 20 XX wieku Griffith sformułował pierwsze historycznie kryterium pękania oparte na prędkości uwalniania energii [5]. W latach 50 XX wieku Irwin przedstawił podstawy mechaniki pękania oparte o podejście siłowe. Bazując na analizie ośrodka liniowo sprężystego ze szczeliną opisał on naprężenia powstające w rozciągającym się spękaniu i wprowadził współczynnik intensywności naprężeń K , który jest wystarczający do pełnego opisu stanu naprężeń w pobliżu wierzchołka szczeliny [2, 5]. Jak wykazał German w pracy [5] opis energetyczny jest zgodny z opisem siłowym. W latach 60 XX wieku Rice rozszerzył podstawy mechaniki pękania w zakresie nieliniowo sprężystym, wprowadzając koncepcję całki $-J$ [3], jako energii potrzebnej do wytworzenia nowej powierzchni o jednostkowym polu.

Badania nad zastosowaniem mechaniki pękania do oceny mieszanek mineralno-asfaltowych pod kątem odporności na pęknięcie są rozwijane na świecie przez wielu badaczy. Jedne z pierwszych prac prowadził Majidzadeh i wsp. oraz Monismith i wsp. w latach 70 XX wieku. Badania rozwijane były w latach 80 i 90 XX wieku między innymi przez Molenaara i Jacobsa [6]. Począwszy od lat 90 zagadnienie mechaniki pękania mieszanek mineralno-asfaltowych jest szeroko badane na świecie.

W ostatnich latach wykonano bardzo dużą ilość badań z mechaniki pękania dla mieszanek mineralno-asfaltowych stosując głównie zginanie trzypunktowe belek prostopadłościennych lub próbek półwałcowych. Z przeglądu literatury tego zagadnienia można wyciągnąć następujące wnioski:

Współczynnik intensywności naprężeń K nie zależy od kształtu badanej próbki [2, 3], a energia pękania G_f od tego kształtu zależy i jest większa przy próbkach półwałcowych niż prostopadłościennych [2].

Wartość współczynnika intensywności naprężeń K wzrasta ze spadkiem temperatury badania [1, 2]. Stwierdzono jednak w [7], że odporność na pęknięcie rośnie przy oziębianiu do -15°C , a przy dalszym oziębianiu poniżej -15°C maleje. Można dodać, że często tak samo zachowuje się wytrzymałość mma na zginanie.

Wartość energii pękania G_f maleje ze spadkiem temperatury [2, 13].

Rodzaj mieszanki i jej skład wpływa na parametry mechaniki pękania. Rolę odgrywa rodzaj asfaltu (zwykły czy modyfikowany), klasyfikacja funkcjonalna asfaltu PG , zawartość wolnych przestrzeni w mieszance oraz rodzaj kruszywa (granit, wapień) [1, 7, 8, 9]. Stwierdzono, że drobnoziarniste mieszanki charakteryzują się wyższą energią pękania G_f od mieszanek gruboziarnistych [13].

Mieszanki wytwarzane na ciepło mają podobne współczynniki intensywności naprężeń jak mieszanki wytwarzane na gorąco [16].

Istnieje wpływ warunków badania na wyniki, takich jak prędkość obciążenia, głębokość nacięcia próbki i sposób przechowywania próbek [7, 8]. Istnieje także wpływ efektu skali w badaniach próbek o różnych wymiarach [17].

W niektórych badaniach wykazano istotne związki korelacyjne parametrów mechaniki pękania i wytrzymałości oraz modułów sztywności mierzonych w klasycznych metodach [1]; w innych badaniach takich wyraźnych związków nie stwierdzono [9]. Nie stwierdzono też dobrej korelacji z wynikami testu spękań niskotemperaturowych $TSRST$ [9].

Jak widać szereg szczegółowych zagadnień stanowiło przedmiot intensywnej badań, ale zjawisko pęknięcia mieszanek mineralno-asfaltowych jest bardzo złożone i problem jest wciąż nie rozwiązany. W Polsce temat ten nie był dotychczas szerzej badany. W Katedrze Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej od kilku lat trwają badania nad określaniem parametrów mechaniki pęknięcia mieszanek mineralno-asfaltowych, które obecnie prowadzone są przez autorów artykułu.

Metodyka badania mechaniki pęknięcia mieszanek mineralno-asfaltowych określona jest obecnie w normie europejskiej PN-EN 12 697-44 [19] oraz w propozycji amerykańskiej normy AASHTO *Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semi Circular Bend Geometry (SCB)*. Oba dokumenty bazują na badaniach naciętej próbki półwałcowej zginanej w schemacie belki trzypunktowej. W literaturze spotyka się również często badania prowadzone na naciętych próbkach prostopadłościennych zginanych w schemacie belki trzypunktowej [7, 13, 10, 16] oraz na naciętych próbkach dyskowych poddawanych rozciąganiu [9, 12, 14].

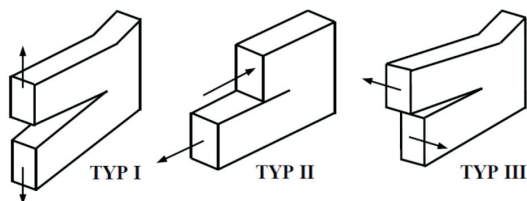
Dotychczasowe badania prowadzone przez autorów miały na celu rozpoznanie metody badawczej oraz możliwości jej zastosowania przy użyciu powszechnie dostępnej aparatury pomiarowej.

Podstawy teoretyczne analizy wyników

Na podstawie przeprowadzonych badań i otrzymanych wyników wyznaczono wielkości charakteryzujące właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych w procesie pęknięcia, przy typie I obciążenia szczeliny (zainicjowanego spęknięcia):

- krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{IC} , zwany odpornością materiału na pęknięcie,
- krytyczną wartość całki J_C , której wielkość charakteryzuje prędkość uwalniania energii odkształcenia.

Na rys. 1 przedstawiono możliwe typy obciążenia szczeliny występujące w mechanice pęknięcia. W przypadku pracy warstw asfaltowych nawierzchni najbardziej interesujący jest typ I, w którym naprężenia działają prostopadłe do płaszczyzny spęknięcia. W sytuacji krytycznej, w chwili wystąpienia naprężenia krytycznego dochodzi do nagłego i niekontrolowanego rozprzestrzeniania się spęknięcia.



Rys. 1. Typy obciążenia szczeliny [5]

Współczynnik intensywności naprężeń K_I oraz jego krytyczną wartość, K_{IC} określono z następującego wzoru, według [11]:

$$K_I = Y_I \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

w którym:

Y_I – znormalizowany współczynnik intensywności naprężeń w I typie obciążenia szczeliny, zależny od geometrii próbki wyznaczony ze wzoru:

$$Y_I = \frac{1,99 - \left(\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2,15 - 3, \frac{93a}{W} + \frac{2,7a^2}{W^2}\right)}{\sqrt{\pi} \left(1 + \frac{2a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{2/3}} \quad (2)$$

σ_0 – naprężenie maksymalne wyznaczone ze wzoru:

$$\sigma_0 = \frac{3F_{\max} S}{2W^2 B} \quad (3)$$

F_{\max} – maksymalna siła,
 a – głębokość nacięcia,
 S – rozpiętość belki,
 W – wysokość belki,
 B – szerokość belki.

Współczynnik intensywności naprężeń K_I jest stałą materiałową charakteryzującą odporność materiału na pęknięcie. Został on wprowadzony w teorii pęknięcia podanej przez Griffitha. Jeżeli weźmiemy pod uwagę rozciągane pasmo materiału sprężystego z otworem eliptycznym o długości $2l$ (rys. 2), to krytyczną wartość naprężenia σ_{kr} , przy którym następuje niekontrolowane pęknięcie materiału, w płaskim stanie odkształcenia, określa wzór:

$$\sigma_{kr} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l(1-\nu^2)}} \quad (4)$$

lub:

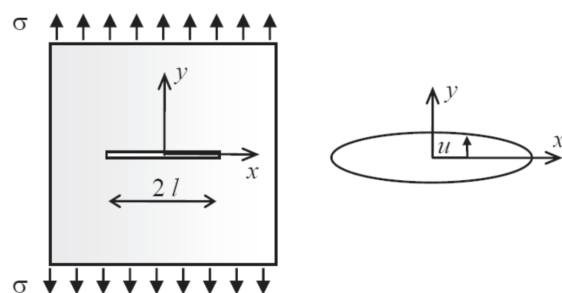
$$\sigma_{kr} = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi l}} \quad (5)$$

w którym:

K_{IC} – stała materiałowa określona wzorem:

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{1-\nu^2}} \quad (6)$$

E – moduł sprężystości,
 γ – energia potrzebna do utworzenia jednostkowej swobodnej powierzchni przy pękaniu,
 $2l$ – długość szczeliny,
 ν – współczynnik Poissona.



Rys. 2. Szczelina Griffitha [5]

Znając wartość odporności na pękanie K_{IC} mieszanki mineralno-asfaltowej możliwe jest obliczenie maksymalnej siły, lub maksymalnego naprężenia, przy którym następuje niekontrolowany wzrost rozwarcia pęknięcia, a więc propagacja spękania aż do zniszczenia materiału.

Krytyczną wartość całki J charakteryzującą krytyczną prędkość uwalniania energii odkształcenia, J_c określono ze wzoru [15]:

$$J_c = -\left(\frac{1}{B}\right) \frac{dU}{da} \quad (7)$$

w którym:

B – szerokość belki,

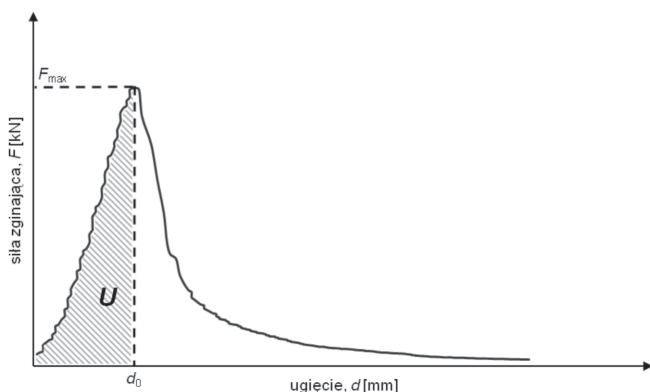
a – głębokość nacięcia,

U – energia odkształcenia do zniszczenia,

dU/da – zmiana energii odkształcenia ze zmianą głębokości nacięcia.

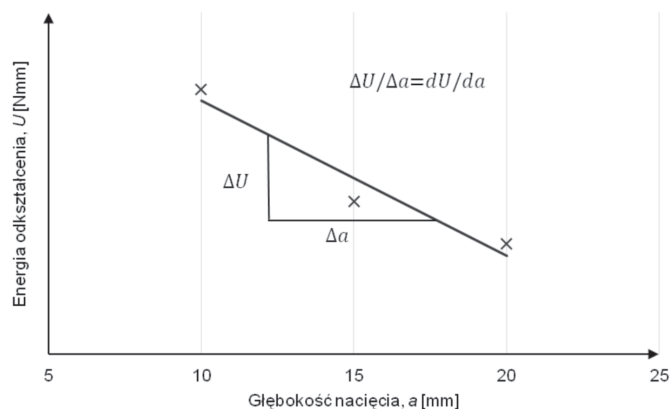
Całka J_c jest miarą krytycznej prędkości uwalniania energii odkształcenia. Jej znaczenie można zinterpretować jako ilość energii potrzebnej do wywołania jednostkowej wartości spękania materiału, co wynika ze wzoru (7). Materiały o większej wartości J_c mają większą odporność na propagację spękania i odwrotnie. W przypadku materiału o wyższej wartości J_c potrzeba włożyć więcej energii, aby wywołać proces niekontrolowanej propagacji spękania. Elseifi i wsp. [4] przeprowadzili badania spękań nawierzchni na Florydzie i badania laboratoryjne parametru J_c . Stwierdzili oni, że istnieje korelacja intensywności spękań nawierzchni z parametrem J_c i ilość spękań wzrasta, gdy parametr J_c maleje. Można więc stwierdzić, że mieszanki mineralno-asfaltowe o większych wartościach parametru J_c , w identycznych warunkach pracy pod obciążeniem, będą bardziej odporne na spękania od mieszanek o mniejszych wartościach parametru J_c .

Parametry K_{IC} i J_c wyznaczono na podstawie wyników badań laboratoryjnych w następujący sposób. Z badań każdej próbki (rys. 5) otrzymano zależność pomiędzy siłą zginającą F a ugięciem belki d . Przykład takiej zależności pokazano na rys. 3. Na wykresie wyznaczono wartość maksymalnej siły zginającej F_{max} . Wartość tę wykorzystywano do obliczania maksymalnego naprężenia (wytrzymałości próbki) σ_0 ze wzoru (3). Następnie ze wzoru (2) obliczano znormalizowany współczynnik intensywności naprężeń Y_1 , a ze wzoru (1) krytyczną wartość współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} (odporność na pękanie).



Rys. 3. Przykład zależności pomiędzy siłą zginającą belkę F a ugięciem belki d

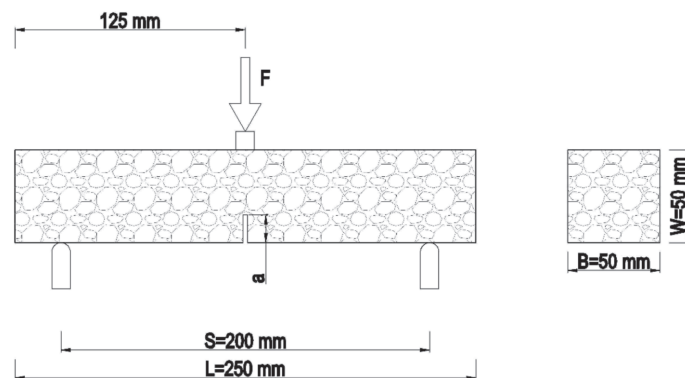
W celu określenia drugiego parametru mechaniki pękania – całki J_c , wielkości charakteryzującej krytyczną prędkość uwalniania energii odkształcenia, z badania każdej próbki określano energię odkształcenia U jako powierzchnię pola pod krzywą $F(d)$ w zakresie siły od zera do F_{max} , co pokazano na rys. 3. W celu określenia pochodnej dU/da , która występuje we wzorze (7) na całkę J_c , określono średnią wartość energii odkształcenia U badanych próbek jednorodnych o jednakowej głębokości nacięcia a (dla trzech głębokości nacięcia), a następnie do każdego rodzaju betonu asfaltowego utworzono wykres zależności $U(a)$. Przykład takiej zależności przedstawia rys. 4. Z wykresu, który zawsze miał formę liniową, określono pochodną dU/da jako pochylenie prostej w układzie $U(a)$. Następnie określono całkę J_c z zależności (7).



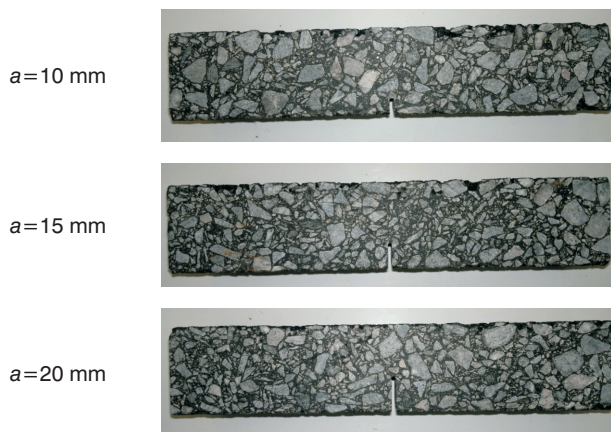
Rys. 4. Przykład zależności energii odkształcenia U od głębokości nacięcia belki a

Metodyka badań laboratoryjnych

Badania wykonano z wykorzystaniem uniwersalnej prasy wytrzymałościowej wyposażonej w czujnik do pomiaru siły i czujnik do pomiaru przemieszczenia oraz w komorę klimatyczną. Badania zostały przeprowadzone na próbkach prostopadłościennych z nacięciem inicjującym spękanie; schemat próbki przedstawiono na rys. 5. Widok próbek z różnymi głębokościami nacięcia pokazano na fot. 1. Widok próbki podczas badania pokazano na fot. 2, natomiast próbkę po badaniu na fot. 3.



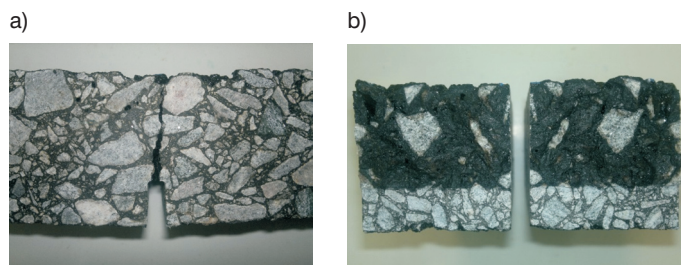
Rys. 5. Schemat próbki badawczej



Fot. 1. Próbkę z różnymi głębokościami nacięcia przygotowane do badania



Fot. 2. Próbkę podczas badania



Fot. 3. Widok próbki po badaniu. a) widoczne spękanie, b) widoczna piaszczysta pęknięcia

Przeprowadzone badania polegały na zginaniu belki wolnopodpartej ze stałym przesuwem tłoka, wynoszącym 1 mm/min. Podczas badania rejestrowano pionowe przemieszczenie tłoka, czyli ugięcie belki d , oraz siłę zginającą F wywieraną na próbkę. Wyniki przedstawiane są w postaci wykresów $F(d)$. Badania przeprowadzono w temperaturze -10°C .

Badane materiały

Badania przeprowadzono na próbkach sporządzonych z mieszanek konwencjonalnych betonów asfaltowych (AC) oraz z mieszanek betonu asfaltowego o wysokim module sztywności (AC WMS). Przebadano pięć następujących mieszanek:

- AC 16 W 35/50 – beton asfaltowy z asfaltem drogowym 35/50,
- AC 16 W 50/70 – beton asfaltowy z asfaltem drogowym 50/70,
- AC WMS 16 20/30 – beton asfaltowy o wysokim module sztywności z asfaltem drogowym 20/30,

Tabela 1. Podstawowe parametry badanych betonów asfaltowych

Cecha:	Uziarnienie betonu asfaltowego AC 16 W		Uziarnienie betonu asfaltowego o wysokim module sztywności AC WMS 16		
	AC 16 W 35/50	AC 16 W 50/70	AC WMS 16 20/30	AC WMS 16 20/30 wielorodzajowy	AC WMS 16 25/55-60
Zawartość asfaltu, %	4,6	4,6	5,0	5,0	5,0
Zawartość wolnych przestrzeni, %	4,3	4,2	3,6	3,5	3,5
Zawartość wolnych przestrzeni w mieszance mineralnej, %	15,2	15,1	15,5	15,4	15,4
Zawartość wolnych przestrzeni wypełnionych lepizczem, %	71,8	72,4	76,9	77,3	77,3
Właściwości asfaltu					
Penetracja w 25°C, 0,1 mm, wg PN-EN 1426	48	67	23	24	28
Temperatura mięknięcia PiK, °C, wg PN-EN 1427	53	48	58	68	62

- AC WMS 16 20/30 wielorodzajowy – beton asfaltowy o wysokim module sztywności z asfaltem wielorodzajowym 20/30,
- AC WMS 16 25/55-60 – beton asfaltowy o wysokim module sztywności z asfaltem modyfikowanym 25/55-60.

Mieszanki AC 16 W przeznaczone są do warstw wiążących, natomiast AC WMS 16 do warstw wiążących i do podbudów asfaltowych.

Wszystkie przebadane mieszanki mineralno-asfaltowe wykonano przy użyciu tego samego materiału mineralnego: wypełniacza wapiennego, kruszywa drobnego oraz grubego, pochodzącego z przekruszenia skały litych. Kruszywo drobne i grube pochodziło ze skały granitowej. Zaprojektowano dwie krzywe uziarnienia. Jedną do betonów asfaltowych AC 16 W, drugą do betonów asfaltowych o wysokim module sztywności AC WMS 16. Podstawowe parametry zaprojektowanych mieszanek mineralno-asfaltowych oraz właściwości zastosowanych asfaltów przedstawiono w tabeli 1.

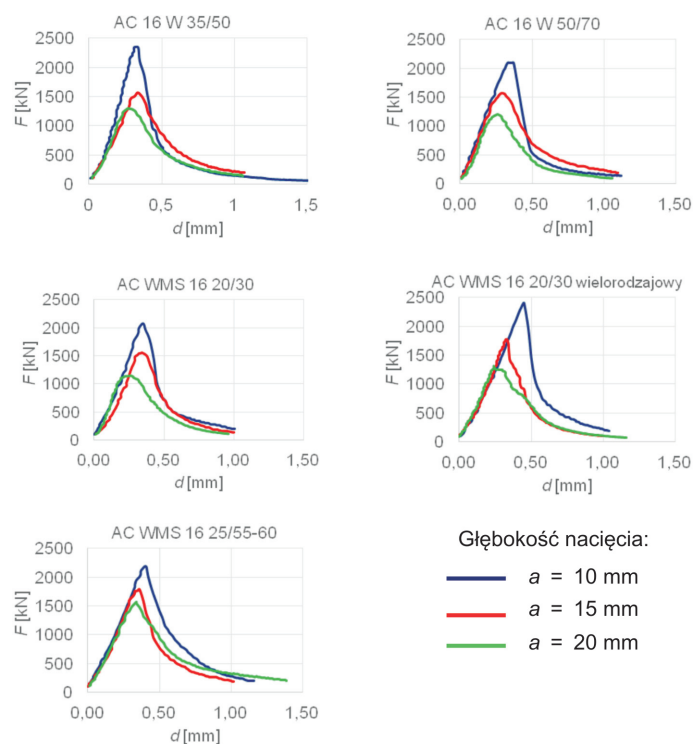
Próbki zagęszczano w hydraulicznej zagęszczarce laboratoryjnej formując płyty o wymiarach 300×300×50 mm. Z każdej płyty wycinano 5 próbek o wymiarach 50×50×250 mm. Próbki nacinano w środku rozpiętości formując nacięcie o szerokości 1,5 mm i o trzech różnych głębokościach 10, 15 i 20 mm, co pokazano na fot. 1. Z każdego rodzaju betonu asfaltowego przygotowano po 3 próbki do każdej głębokości nacięcia, łącznie po 9 próbek. W serii jednorodnej badano co najmniej 3 próbki. Razem wykonano badania na 45 próbkach.

Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań parametrów K_{IC} i J_C wszystkich rodzajów badanych betonów asfaltowych i głębokości nacięć belek a pokazano w tabeli 2. W tabeli 2 podano również zmierzone wartości siły maksymalnej F_{max} , energii odkształcenia U , naprężeń maksymalnych σ_0 oraz pochodnych dU/da do wszystkich badanych betonów asfaltowych.

Z tabeli 2 widać, że współczynnik intensywności naprężeń K_{IC} nie zależy od głębokości nacięcia a . Siła maksymalna F_{max} oraz energia U zależą od głębokości nacięcia, a uzyskane wartości maleją wraz z jego głębokością.

Na rys. 6 przedstawiono zależności siły zginającej F od ugięcia belki d dla wszystkich badanych rodzajów betonów asfaltowych. Rys. 7 przedstawia zestawienie zależności energii odkształcenia U od głębokości nacięcia belki a dla wszystkich badanych betonów asfaltowych. Na rys. 7 podano także

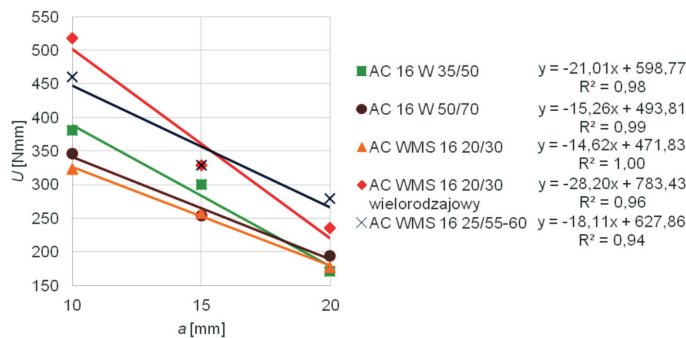


Rys. 6. Wykres zależności siły zginającej F od ugięcia d przy różnych głębokościach nacięcia a próbek badanych betonów asfaltowych

Tabela 2. Wyniki badań parametrów mechaniki spękań K_{IC} i J_C betonów asfaltowych (wartości średnie z 3 próbek)

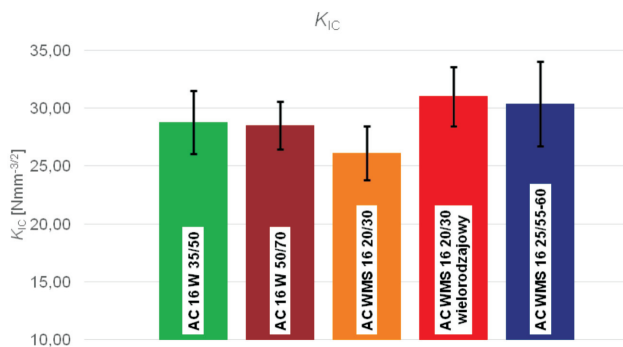
Beton asfaltowy	a [mm]	F_{max} [N]	U [N*mm]	σ_0 [N/mm ²]	K_{IC} [N*mm ^{-3/2}]	K_{IC} średnie [N*mm ^{-3/2}]	dU/da [N]	J_C [kJ/m ²]
AC 16 W 35/50	10	2258	381	5,418	30,02	28,79	-21,01	0,42
	15	1626	299	3,902	28,00			
	20	1253	171	3,006	28,11			
AC 16 W 50/70	10	2175	346	5,221	28,93	28,53	-15,26	0,31
	15	1656	254	3,974	28,52			
	20	1245	194	2,988	27,95			
AC WMS 16 20/30	10	1984	323	4,762	26,39	26,12	-14,62	0,29
	15	1513	257	3,630	26,05			
	20	1150	177	2,759	25,80			
AC WMS 16 20/30 wielorodzajowy	10	2402	517	5,765	31,94	31,01	-28,20	0,56
	15	1728	328	4,148	29,77			
	20	1403	235	3,367	31,49			
AC WMS 16 25/55-60	10	2089	460	5,012	27,77	30,38	-18,11	0,36
	15	1792	329	4,301	30,86			
	20	1565	279	3,756	35,13			

liniowe równania regresji, z których odczytać można wartość pochodnych dU/da , wykorzystywanych do obliczania całki J_C z równania (7).

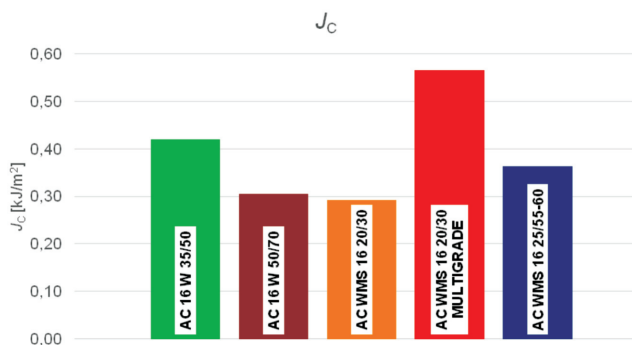


Rys. 7. Wykres zależności energii odkształcenia U od głębokości nacięcia a

Wyznaczone na podstawie badań parametry mechaniki pęknięcia betonów asfaltowych przedstawiono na rys. 8 i 9. Słupki rozrzutów wyników na wykresie parametru K_{IC} reprezentują odchylenie standardowe obliczone dla 9 wyników badań każdego betonu asfaltowego.



Rys. 8. Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{IC} (odporność na pęknięcie) badanych betonów asfaltowych (słupki rozrzutów pokazują odchylenia standardowe)



Rys. 9. Krytyczna wartość całki J_C badanych betonów asfaltowych

W celu zweryfikowania istotności różnic w otrzymanych wynikach badań próbek poszczególnych betonów asfaltowych przeprowadzono analizę statystyczną opartą na teście t-Studenta. Analizie poddano istotność różnic wartości śred-

nich krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} . Obliczenia wykonano dla założonego poziomu ufności $P=80\%$. Wyniki analiz przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Czy różnice wartości średnich krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} są istotne dla poziomu ufności $P = 80\%$?

Rodzaj betonu asfaltowego	AC 16 W 35/50	AC 16 W 50/70	AC WMS 16 20/30	AC WMS 16 20/30 wielorodzajowy	AC WMS 16 25/55-60
AC 16 W 35/50	X	NIE	TAK	TAK	NIE
AC 16 W 50/70	NIE	X	TAK	TAK	NIE
AC WMS 16 20/30	TAK	TAK	X	TAK	TAK
AC WMS 16 20/30 wielorodzajowy	TAK	TAK	TAK	X	NIE
AC WMS 16 25/55-60	NIE	NIE	TAK	NIE	X

Przy ocenie wyników badań należy pamiętać o interpretacji znaczenia parametrów K_{IC} i J_C . Ogólnie biorąc, przy wzroście tych parametrów materiały mają większą odporność na propagację spękań. W przypadku parametru K_{IC} z inżynierskiego punktu widzenia nie otrzymano bardzo dużych istotnych różnic badanych betonów asfaltowych. Wszystkie wyniki badań w temperaturze -10°C zawierały się w przedziale od 26 do 31 $\text{N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$. Analiza statystyczna wykazała jednak, że różnice były istotne i możliwe jest uszeregowanie badanych betonów asfaltowych pod kątem odporności na pęknięcie. Najlepszy parametr K_{IC} charakteryzował AC WMS 16 z asfaltem wielorodzajowym, co widać na rys. 8 i w tabeli 2. Beton asfaltowy AC WMS 16 z asfaltem wielorodzajowym ma parametr K_{IC} porównywalny z AC WMS 16 z asfaltem modyfikowanym 25/55-60. Najgorszy parametr K_{IC} charakteryzował AC WMS 16 z asfaltem 20/30, co widać na rys. 8 i potwierdza porównanie w tabeli 3.

Dużo większe różnice wystąpiły w przypadku parametru J_C (rys. 9). W tym przypadku wyraźnie najwyższym (najlepszym) parametrem J_C charakteryzował się AC WMS z asfaltem wielorodzajowym, a najniższym (najgorszym) AC WMS z asfaltem drogowym 20/30 i AC 16 W z asfaltem drogowym 50/70. Na rys. 9 nie pokazano słupków rozrzutów wyników, ponieważ z badanych 9 próbek jednorodnych dla każdego rodzaju betonu asfaltowego obliczono tylko jedną wartość parametru J_C .

W badaniu parametru K_{IC} beton asfaltowy AC 16 W 50/70 miał istotnie lepsze właściwości niż AC WMS 20/30, porównywalne z AC 16 W 35/50. W przypadku parametru J_C beton asfaltowy AC 16 W 50/70 był wyraźnie gorszy od AC 16 W 35/50.

Jak widać, wyniki nie są w pełni jednoznaczne i zagadnienie oceny mieszanek mineralno-asfaltowych według parametrów mechaniki pęknięcia wymaga dalszych badań. Można przypuszczać, że nie tylko typ mieszanki i rodzaj asfaltu, ale także parametry fizyczne mieszanki, jej skład, powinowactwo asfaltu i kruszywa oraz zawartość wolnej przestrzeni ma duży wpływ na parametry mechaniki pęknięcia, co wykazali [1, 7, 8, 9]. Z badań wynika jednak, zgodnie w przypadku obu parametrów mechaniki pęknięcia K_{IC} i J_C , że najbardziej podatnym na propagację spękań jest beton asfaltowy o wysokim mo-

dule sztywności z asfaltem drogowym 20/30, oznaczony jako AC WMS 16 20/30.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych przez autorów badań można stwierdzić, że parametry mechaniki pęknięcia mieszanek mineralno-asfaltowych można wyznaczyć w laboratorium przy zastosowaniu stosunkowo powszechnego sprzętu badawczego.

Dokładne rozpoznanie procesu propagacji spękania może przyczynić się do poprawy parametrów wbudowywanych mieszanek mineralno-asfaltowych odpowiedzialnych za powstawanie spękań nawierzchni.

Badania wykazały jednoznacznie, że najgorszymi parametrami mechaniki pęknięcia K_{IC} i J_C charakteryzuje się beton asfaltowy o wysokim module sztywności – AC WMS 16 20/30, z asfaltem drogowym 20/30. Najlepsze parametry K_{IC} i J_C miał beton asfaltowy o wysokim module sztywności AC WMS 16 z asfaltem wielorodzajowym. Nieco gorsze parametry K_{IC} i J_C miał beton asfaltowy AC WMS 16 z asfaltem modyfikowanym 25/55-60.

Bibliografia

- [1] M. Arabani, B. Ferdowsi B., *Evaluating the semi-circular bending test for HMA mixtures*, *International Journal of Engineering*, Vol. 22, No. 1, 2009, s. 47-58
- [2] I. Artamendi., H. A. Khalid, *A comparison between beam and semi-circular bending fracture tests for asphalt*, *Road Materials and Pavement Design*, volume 7, supplement 1, 2006, s. 163–180
- [3] B. Birgisson, A. Montepara, E. Romeo, R. Roque, G. Tebaldi, *Influence of mixture properties on fracture mechanisms in asphalt mixtures*, *Road Materials and Pavement Design*, volume 11, supplement 1, 2010, s. 61-88
- [4] M.A. Elseifi, L.N. Mohammad, H. Ying, S. Cooper, *Modeling and evaluation of the cracking resistance of asphalt mixtures using the semi-circular bending test at intermediate temperatures*, *Road Materials and Pavement Design*, volume 13, supplement 1, 2012, s. 124–139
- [5] J. German, *Podstawy mechaniki pęknięcia*, Politechnika Krakowska, Kraków 2011
- [6] J. Judycki, *Fatigue of asphalt mixes*, *Publication of University of Oulu*, Finland 1991
- [7] K.W. Kim, M. El Hussein, *Variation of fracture toughness of asphalt concrete under low temperatures*, *Construction and Building Materials*, 1997, volume 11, issues 7-8, 1997, s. 403-411
- [8] X.-J. Li, M.O. Marasteanu, *Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete*, *Experimental Mechanics*, volume 50, issue 7, 2010, s. 867-876
- [9] M. Marasteanu, A. Zofka, M. Turos, X. Li, R. Velasquez, Li Xue, W. Buttler, G. Paulino, A. Braham, E. Dave, J. Ojo, H. Bahia, C. Williams, J. Bausano, A. Gallistel, J. McGraw, *Investigation of low temperature cracking in asphalt pavements, Final Report, Minnesota Department of Transportation*, MN/RC 2007-43, Minnesota 2007
- [10] B. Mobasher, M.S. Mamlouk, H.-M. Lin, *Evaluation of crack propagation properties of asphalt mixtures*, *Journal of Transportation Engineering*, volume 123, issue 5, 1997, s. 405-413
- [11] Y. Murakami, *Stress Intensity Factors Handbook*, Ed. Pergamon, Oxford, 1987
- [12] M.P. Wagoner, W.G. Buttler, G.H. Paulino, P. Blankenship, *Investigation of the fracture resistance of hot-mix asphalt concrete using a disk-shaped compact tension test*, *Journal of the Transportation Research Board*, volume 1929, 2005, s. 183–192
- [13] M.P. Wagoner, W.G. Buttler, G.H. Paulino, *Development of a single-edge notched beam test for asphalt concrete mixtures*, *Journal of Testing and Evaluation*, volume 33, issue 6, 2005
- [14] M.P. Wagoner, W.G. Buttler, G.H. Paulino, *Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture*, *Experimental Mechanics*, volume 45, issue 3, 2005, s. 270-277
- [15] Z. Wu, L.N. Mohammad, L.B. Wang, M.A. Mull, *Fracture resistance characterization of SUPERPAVE mixtures using the semi-circular bending test*, *Performance tests for hot mix asphalt (HMA) including fundamental and empirical procedures, Monograph, American Society for Testing and Materials*, 2006, s. 127–141
- [16] M.-Y. Yoo, S.-H. Jeong, J.-Y. Park, N.-H. Kim, K.-W. Kim, *Low-temperature fracture characteristics of selected warm-mix asphalt concretes*, *Journal of the Transportation Research Board*, volume 2208, issue 2, 2011, s. 40-47
- [17] E. Zegeye, J.-L. Le, M. Turos, M. Marasteanu, *Investigation of size effect in asphalt mixture fracture testing at low temperature*, *Road Materials and Pavement Design*, volume 13, supplement 1, 2012, s. 88–101
- [18] X.-K. Zhu, J.A. Joyce, *Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization*, *Engineering Fracture Mechanics*, volume 85, 2012, s. 1-46
- [19] PN-EN 12 697-44 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 44 ■

(dokończenie ze str. 218)

ANDRZEJ KULICZKOWSKI, MICHAŁ FUJAWA: **Tunelowanie o przekroju prostokątnym**. „Drogownictwo”, rok LXIX, nr 7-8, 2014, s. 258–265

Przedstawiono metody budowy tuneli o przekroju prostokątnym. Skoncentrowano się na metodach bezwykopowych z uwagi na nieutrudnianie ruchu ulicznego. Przeanalizowano wybrane przykłady urządzeń tarczowych o przekrojach prostokątnych (wraz z kwadratowymi), a także zbliżonych do prostokątnych oraz zaprezentowano przykładowe realizacje tuneli z wykorzystaniem opisanych urządzeń.

Słowa kluczowe: tunele, budowa, przekrój prostokątny.

MAREK MISTEWICZ: **Wspomnienia z odbudowy mostu przez Wisłę w Wyszogrodzie odnalezione pod Nowym Jorkiem**. „Drogownictwo”, rok LXIX, nr 7-8, 2014, s. 266–269

Opisano wspomnienia i zdjęcia z lat 1946-1947 dotyczące historii mostu przez Wisłę w Wyszogrodzie. Ich autorem jest inżynier, który kierował odbudową mostu ze zniszczeń wojennych, a wiosną 1947 r. uczestniczył w jego obronie przed pochodem lodów. Wspomnienia są przechowywane w Stanach Zjednoczonych A.P. przez syna niezjącego ich autora. W 1999 r. syn wysłał list oferujący ich udostępnienie. Odnalezienie po 14 latach listu i jego nadawcy umożliwiło opublikowanie fragmentów wspomnień i wzbogacenie wiedzy o powojennej historii mostu.

Słowa kluczowe: most przez Wisłę, Wyszogród, odbudowa mostu, wspomnienia mostowe.

KRZYSZTOF KAPERCZAK, GRAŻYNA CZARNOWSKA: **Pochylnia i ... rury**. „Drogownictwo”, rok LXIX, nr 7-8, 2014, s. 270–272

Artykuł niniejszy poświęcony jest problemowi dostosowania przestrzeni publicznej do potrzeb osób niepełnosprawnych – miejscowego dostosowania wejścia na kładkę nad torami kolejowymi. Na przykładzie remontu fragmentu chodnika pokazuje proces wyboru wariantu lokalizacji pochylni łączącej chodnik i kładkę.

Słowa kluczowe: przestrzeń publiczna, dostępność, niepełnosprawni.

ANDRZEJ KULICZKOWSKI, MICHAŁ FUJAWA: **Rectangular tunnels construction**. „Drogownictwo”, vol. LXIX, 7-8, 2014, pp. 257–265

The available no-dig methods of rectangular tunnels construction were presented. The authors focused on trenchless technologies as they do not disturb on ground traffic. Chosen examples of rectangular shield machines (including the square ones) as well as quasi rectangular ones were analyzed. The examples of tunnels built using described machines were also presented.

Keywords: tunnels, construction, rectangular shape.

MAREK MISTEWICZ: **Memories of the bridge over Vistula river in Wyszogrod reconstruction found at New York**. „Drogownictwo”, vol. LXIX, 7-8, 2014, pp. 266–269

Memories and pictures dated 1946-1947 related to history of the bridge over Vistula river in Wyszogrod are presented. Their author was a building site manager of the bridge reconstruction works after war damage. In spring 1947 he participated in fight against destructive ice floe. Memories are now stored in the United States by the son of deceased author. In 1999 the son sent a letter to Poland offering access to the memories. Finding after 14 years the letter and its sender has made it possible to publish their excerpts and to enrich our knowledge on the bridge post-war history.

Keywords: bridge over Vistula, Wyszogrod, bridge reconstruction, bridge memories.

KRZYSZTOF KAPERCZAK, GRAŻYNA CZARNOWSKA: **Entrance to foot-bridge and ... pipes**. „Drogownictwo”, vol. LXIX, 7-8, 2014, pp. 270–272

The article discusses the question of adapting public space to the needs of the disabled – adjustment of the entrance to a footbridge over the railway. Based on a case of repairing a section of a pavement it presents the process to select a location for a ramp connecting the pavement and the footbridge.

Keywords: public space, accessibility, disabled.