

# Badanie wpływu rodzaju asfaltu na odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na spękania odbite z wykorzystaniem urządzenia Texas Overlay Tester (TxOT)

## Evaluation of asphalt mixtures cracking resistance with different binder type using Texas Overlay Tester (TxOT)



**Piotr Jaskuła**

Dr inż.

Politechnika Gdańska, Wydział  
Inżynierii Lądowej i Środowiska

piotr.jaskula@wilis.pg.gda.pl



**Cezary Szydłowski**

Mgr inż.

Politechnika Gdańska, Wydział  
Inżynierii Lądowej i Środowiska

cezary.szydowski@wilis.pg.gda.pl



**Marcin Stiens**

Dr inż.

Politechnika Gdańska, Wydział  
Inżynierii Lądowej i Środowiska

marcin.stiens@pg.edu.pl

**Streszczenie:** Spękania są jednym z głównych rodzajów zniszczeń występujących w nawierzchniach asfaltowych, zwłaszcza w przypadku starych nawierzchni, które zostały wzmocnione nowymi warstwami asfaltowymi – nakładką. Mieszanki mineralno-asfaltowe stosowane w takich przypadkach powinny być tak zaprojektowane, aby zapewniały wysoką odporność nowych warstw na spękania odbite. Jednym z czynników minimalizujących ryzyko wystąpienia tego rodzaju uszkodzeń jest dobór odpowiedniego rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz uziarnienia mieszanki mineralnej. W chwili obecnej nie ma jednak powszechnie przyjętej metody badawczej, która pozwoliłaby jednoznacznie określać odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na spękania odbite. W artykule opisano zastosowanie oprzyrządowania do badania wspomnianych charakterystyk, które zostało opracowane w stanie Teksas w USA i określane jest w literaturze jako Texas Overlay Tester. Uzyskane wyniki pokazały, że właściwy dobór lepiszcza asfaltowego w mieszance mineralno-asfaltowej ma znaczący wpływ na jej odporność na spękania odbite i trwałość.

**Słowa kluczowe:** Spękania odbite; nawierzchnia drogowa; Texas Overlay Tester

**Abstract:** Cracking is one of the predominant distresses occurring in flexible pavements, especially in old pavements that were rehabilitated with an asphalt overlay. In such cases asphalt mixtures should be designed to ensure high resistance to reflective cracking. One factor that minimizes this type of distress is the proper mix design process, which should involve selection of specific bitumen binder and mineral mix gradation. However, still there is no universally adopted laboratory test method that would allow to clearly assess resistance of asphalt mixtures to reflective cracking. This paper describes the usage of one of the devices developed to test asphalt mixtures in terms of such distress – Texas Overlay Tester. The results have clearly shown that proper choice of binder used in the asphalt mixture for the overlay will significantly improve its reflective cracking resistance or even fatigue resistance.

**Keywords:** Cracking resistance; pavement; Texas Overlay Tester

Spękania warstw asfaltowych są jednym z głównych problemów pojawiających się w trakcie eksploatacji nawierzchni drogowych. Spękania pojawiają się stopniowo wraz z upływem czasu, w miarę kumulowania się pojedynczych szkód zmęczeniowych wywoływanych przejazdami kolejnych pojazdów. Spękania tego typu określane są jako zmęczeniowe. Inny typ spękania powstaje w sytuacji ułożenia nowych warstw asfaltowych na powierzchni już spękanej lub podatnej na spękania. Nieciągłość materiału w spękaniu dolnej warstwy powoduje wówczas koncentrację naprężeń w nowej warstwie górnej, przez co dochodzi w nich do inicjacji i propagacji nowego spękania. Uszkodzenia takie określane są jako spękania odbite. Opisana sytuacja

może mieć miejsce w przypadku odnawiania starych, spękanych nawierzchni poprzez układanie na nich wprost nowych nakładek asfaltowych, zwłaszcza kiedy istniejące warstwy asfaltowe są znacznie zestarzone i przez to sztywne lub odnawiana jest nawierzchnia z betonu cementowego, w której naturalnym elementem są szczeliny dylatacyjne. Niepożądane spękania odbite mogą jednakże pojawić się dość szybko w stosunkowo nowych nawierzchniach z podbudowami sztywnymi wykonanymi np. z kruszyw lub gruntów związanych/stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi. Należy podkreślić, że podatność mieszanek mineralno-asfaltowych na spękania jest powiązana z tak podstawowymi właściwościami nawierzchni jak trwałość zmęczeniowa

czy odporność na starzenie. Nawet nowe nawierzchnie, które w początkowym okresie eksploatacji wykazują się dużą nośnością strukturalną, w przypadku zastosowania mieszanek mineralno-asfaltowych sztywnych i wrażliwych na spękania, będą wykazywać uszkodzenia znacznie wcześniej niż przewidywano np. w analizie mechanistycznej trwałości zmęczeniowej.

Istnieje kilka sposobów łagodzenia problemu spękań odbitych. W przypadku występowania ryzyka, że spękania z istniejącej starej nawierzchni lub z podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym będą odbijać się na nowo ułożonych warstwach asfaltowych, najczęściej stosuje się następujące techniki: (1) wzmacnianie warstw asfaltowych za pomocą

geosyntetyków o różnym charakterze (geokraty, geosiatki, geokompozyty, siatki szklane, tekstylia) lub siatek stalowych, (2) wprowadzenie warstw pośrednich (SAMI, powierzchniowe utwardzenie, bardzo otwarta mieszanka mineralno-asfaltowa), (3) kontrolowanie spękań odbitych przez nacinanie nowych warstw asfaltowych w miejscu spękań istniejących [28]. Bardziej radykalną metodą, która może być jednak zastosowana tylko w przypadku remontu nawierzchni betonowej jest eliminacja przemieszczeń płyt betonowych poprzez ich rozkruszenie na mniejsze fragmenty lub całkowite przekruszenie płyt na warstwę niezwiązaną [Jaskuła&Judycycki, 2009], [Zapaśnik, 2017]. Innym sposobem zwiększenia odporności na pękanie nawierzchni asfaltowych jest poprawa właściwości przeciwspekaniowych samej mieszanki mineralno-asfaltowej. Można to osiągnąć różnymi sposobami: poprzez wybranie określonego rodzaju asfaltu i jego ilości, rodzaju oraz wielkości uziarnienia mieszanki mineralnej, a także przez zastosowanie różnych dodatków takich jak: polimery, guma pochodząca z recyklingu, włókna rozproszone lub asfalty naturalne [3, 10, 11, 15, 17, 27].

Uzyskanie mieszanki mineralno-asfaltowej o zwiększonej odporności na pękanie zależy nie tylko od procesu projektowania, ale musi również uwzględniać odpowiednią metodę badawczą, pozwalającą na zróżnicowanie mieszanek pod względem ich charakterystyk pękania. Przez wiele lat badania koncentrowały się głównie na określaniu odporności mieszanek na deformacje trwałe (badanie w koleinomierzu, badanie w koleinomierzu metodą hamburską i inne), trwałości zmęczeniowej (badanie belki 4-punktowo i 2-punktowo zginanej) oraz właściwościach niskotemperaturowych (TSRST, ATCA). Rozwój metod badawczych dedykowanych charakterystyce pękania rozpoczął się dopiero w ciągu ostatnich lat, kiedy okazało się że obecnie stosowane mieszanki mineralno-asfaltowe zoptymalizowane pod względem odporności na koleinowanie i często zawierające dużą ilość destruktu asfaltowego mogą być bardziej podatne na spękania, niż mieszanki stosowane wcześniej. Do chwili obecnej opracowano wiele metod badawczych do określania podatności mieszanek mineralno-asfaltowych na

pękanie: (1) Semi Circular Bending test w różnych temperaturach (SCB), (2) Disc Shape Compact Tension test (DCT), (3) Bending Beam Fatigue (BBF), (4) Indirect Tensile test (IDT) oraz (5) Texas Overlay Tester (TxOT). Każda z wymienionych metod posiada swoje specyficzne cechy i zalety, jednakże żadna z nich nie jest w dalszym ciągu powszechnie stosowana. Niemniej jednak, biorąc pod uwagę ich różne, nieraz specyficzne kryteria oceny mieszanek, metoda Texas Overlay Tester (nazywana dalej w artykule skrótem TxOT) wydaje się dość obiecująca i warta przybliżenia. Pierwsza wersja metody badawczej TxOT została opracowana przez Germann'a i Lytonn'a [9] w celu oceny odporności na spękania odbite, które mogą się pojawić w nowych warstwach ułożonych na istniejącej, nieciągłej konstrukcji nawierzchni. Metoda na tym etapie wykorzystywała prostokątne, prostopadłościennne belki, które były poddawane poziomym przemieszczeniom mającym odwzorować ruchy termiczne występujące w przykrytych, starych nawierzchniach. Badano również wpływ geotekstyliów wykorzystywanych do zbrojenia warstw asfaltowych. W późniejszych latach metoda została zmodyfikowana przez Zhou i Scullion'a [24] poprzez zmianę kształtu próbek, co miało ułatwić ich przygotowanie w laboratorium lub z odwiertów z nawierzchni. Obecnie metoda ta jest wykorzystywana przez zarząd drogowy w stanie Texas w USA (Texas DOT), który opracował własną procedurę badawczą Tex248-F [19, 20]. Istnieje również podobna międzynarodowa norma ASTM WK26816 [2]. W Polsce wciąż nie ma publikacji ani raportów badawczych dotyczących wykorzystania metody TxOT w polskich warunkach, z uwzględnieniem polskich rodzajów mieszanek oraz asfaltów stosowanych w Polsce.

## Cel i zakres badań

Celem badań była weryfikacja przydatności metody TxOT dla oceny charakterystyk pękania mieszanek mineralno-asfaltowych z typowymi asfaltami wykorzystywanymi w Polsce, w szczególności pod względem wpływu zastosowanych różnych asfaltów wraz ze specjalnymi dodatkami wchodzącymi w skład mieszanki.

Zakres badań obejmował jeden rodzaj

mieszanki mineralno-asfaltowej z różnymi rodzajami asfaltu oraz wybranymi dodatkami. Mieszankę wybraną do badań zaprojektowano tak, aby mogła być zastosowana do wykonania nakładki (takiej jak warstwa wyrównawcza wykonywana na starej nawierzchni z betonu asfaltowego przed ułożeniem warstwy ścieralnej) i spełniała wymagania stawiane standardowej mieszance mineralno-asfaltowej do warstwy wiążącej AC 11 W. Zastosowano cztery różne lepiszcza: jeden asfalt drogowy, dwa asfalty modyfikowane polimerem (miękki i twardy) oraz asfalt wysokomodyfikowany. Wszystkie wykorzystane asfalty są powszechnie stosowane w Polsce do mieszanek mineralno-asfaltowych. W przypadku mieszanek z asfaltem drogowym zastosowano również dwa różne dodatki: grys gumowy i włókna polimerowe.

## Badane materiały

Do badań laboratoryjnych wytypowano cztery różne asfalty: asfalt drogowy 35/50, dwa asfalty modyfikowane polimerem: 10/40-65 i 25/55-60 oraz asfalt wysokomodyfikowany 25/55-80.

Wszystkie asfalty zostały wyprodukowane w polskich rafineriach. W Tabeli 1 przedstawiono właściwości wg PN-EN 12591:2010 i PN-EN 14023:2011 oraz klasyfikację performance grade (PG) wg. AASHTO M320 [1, 29] zastosowanych asfaltów. Do badań wytypowano beton asfaltowy zaprojektowany zgodnie z normą PN-EN 13108-1 [6] oraz Wymaganiami Technicznymi WT-2 2014 [14]. W Tabeli 2 przedstawiono skład i parametry objętościowe podstawowej mieszanki AC 11 W z asfaltem drogowym 35/50 zagęszczonej za pomocą ubijaków Marshalla. W pozostałych przypadkach zmieniano rodzaj asfaltu, utrzymując zawartość asfaltu na tym samym poziomie, tj. 5,6%.

Mieszanki mineralno-asfaltowe zostały przygotowane w warunkach laboratoryjnych zgodnie z normą PN-EN 12697-35 [5]. Przed zagęszczeniem luźna mieszanka była poddana starzeniu zgodnie z procedurą zawartą w Załączniku 2 dokumentu WT-2:2014 [14]. W przypadku mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem drogowym 35/50 zastosowano również dwa rodzaje dodatków: dodatek włókien polimerowych i dodatek granulatu gumowego w celu modyfikacji

właściwości asfaltu. W pierwszym przypadku dodawano polimerowe włókna (aramidowo-polialfaolefinowe) o długości 19 mm bezpośrednio do mieszanki mineralno-asfaltowej. Dodatek włókien wynosił 0,05% w stosunku do masy mieszanki mineralno-asfaltowej. Użyto włókien specjalnie zaprojektowanych do stosowania jako zbrojenie rozproszone w warstwach asfaltowych [3, 11, 12].

W drugim przypadku dodawano mieszanekę granulatu gumowego pochodzącego z recyklingu opon samochodowych oraz granulowanego polimeru (polioktynameru) w łącznej ilości (tj. granulatu i polimeru) 10% w stosunku do masy asfaltu. Przy dozowaniu opisywanej mieszanki do 2000 gramów asfaltu ilość właściwego granulatu gumowego o frakcji 0,2/0,8 mm wynosiła 191 gramów, zaś ilość polimeru 9 gramów (łącznie 200 gramów). Proces łączenia składników przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych w mieszarce z prędkością 200 obr./min przez 120 minut. Temperaturę podczas mieszania utrzymywano w zakresie 170-180°C. Opisany powyżej proces dotyczył jedynie warunków laboratoryjnych. Podczas pełnowymiarowej produkcji dodatek jest dozowany bezpośrednio do mieszalnika z suchym kruszywem i mieszany przez około 8-10 sekund, zanim zostanie podany ciekły asfalt. Każdy rodzaj modyfikacji asfaltu gumą poprawia właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych, w szczególności w zakresie spękań niskotemperaturowych [4, 13, 15, 16, 18, 23].

W celu uzyskania podstawowych informacji o wpływie rodzaju asfaltu i dodatków na parametry mieszanek mineralno-asfaltowych przeprowadzono badanie koleinowania zgodnie z normą PN-EN 12697-22. Wyniki przedstawiono w Tabeli 3.

## Metodyka badania TxOT

Metodykę badania TxOT przyjęto zgodnie z procedurą opisaną w amerykańskiej normie Tex-248-F [20].

W opisywanym badaniu wykorzystano próbki o wymiarach: 150 mm długości, 75 mm szerokości i 37,5 mm grubości, które wycięto ze standardowych próbek walcowych zagęszczanych w prasie żyratorowej. Średnica próbek walcowych wynosiła 150 mm, zaś ich wysokość 115 mm. Próbki żyratorowe zostały

Tab. 1. Właściwości asfaltów użytych w badaniach

Właściwości		Rodzaj asfaltu				
		35/50	35/50 R	10/40-65	25/55-60	25/55-80
Penetracja w 25°C, 0,1 mm, wg PN-EN 1426	Original	45	39	26	34	50
	RTFOT	28	24	21	25	41
PiK, Temperatura, °C, wg PN-EN 1427	Original	53,0	60,7	68,0	62,6	87,5
	RTFOT	60,1	69,9	71,4	68,2	89,1
Performance Grade, wg AASHTO M 320		70-16	82-16	82-16	76-22	82-22
R – modyfikacja gumą, dodatek komercyjny						

Tab. 2. Skład i parametry objętościowe mieszanki mineralno-asfaltowej AC 11 W z asfaltem 35/50

Rodzaj warstwy	warstwa wiążąca/ wyrównawcza							
Ruch projektowy	średni – od 0,50x106 do 7,3x106 osi standardowych 100kN							
Rodzaj kruszywa	C90/3, granit							
Rodzaj wypełniacza	wapień							
Zawartość asfaltu (% m/m)	5,6							
Wolne przestrzenie w próbkach Marshalla (2 x 75 uderzeń) [%]	3,3							
Zawartość wolnych przestrzeni wypełnionych lepiszczem VFB [%]	80,4							
Zawartość wolnych przestrzeni w mieszanke mineralnej VMA [%]	16,6							
Rozmiar sita (mm)	16	11,2	8	5,6	4	2	0,125	0,063
% Przesiew (m/m)	100	99	83	65	54	43	12	7,4

Tab. 3. Wyniki badania koleinowania mieszanki AC 11 W z różnymi asfaltami i dodatkami

Rodzaj asfaltu	35/50	35/50 R	35/50 F	10/40-65	25/55-60	25/55-80
Odporność na koleinowanie, metoda B w powietrzu, 60°C, 10 000 cykli						
WTS AIR, [mm/1000 cykli]	0,28	0,09	0,25	0,19	0,15	0,12
PRD AIR, [%]	6,7	3,3	6,2	5,3	4,5	3,8
R – modyfikacja gumą, F – dodatek włókien						

zagęszczane wg normy PN-EN 12697-31 [4] do uzyskania wskaźnika zagęszczenia zawierającego się w przedziale 98-100% gęstości próbek zagęszczanych w ubijaku Marshalla. Na Rysunku 1 przedstawiono wymiary wyciętych próbek. W Tabeli 4 zestawiono natomiast zawartość wolnych przestrzeni w wyciętych próbkach, oddzielnie dla każdej mieszanki mineralno-asfaltowej z różnym asfaltem. Dla każdej mieszanki przygotowano do badań po 3 próbki przycięte do badania TxOT. Należy zwrócić uwagę, że z próbki żyratorowej o dość znacznej wysokości 115 mm uzyskuje się tylko jedną próbkę do badania TxOT o grubości 38 mm pozyskaną ze środkowej części próbki żyratorowej, ponieważ skrajne fragmenty są odrzucane. W ten sposób uzyskuje się próbki o dużej jednorodności i równomiernym rozmieszczeniu wolnych przestrzeni w objętości.

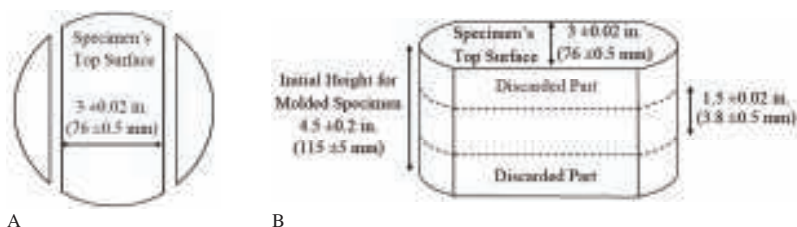
Temperatura zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem drogowym 35/50 wynosiła 135°C ± 5°C, a w przypadku mieszanek z asfaltami modyfikowanymi polimerami 145°C ± 5°C.

Po wycięciu każda próbka została

przyklejona klejem epoksydowym do dwóch metalowych płytek, jak pokazano na Rysunku 2. Podczas klejenia próbki do metalowych płytek są one tymczasowo przykręcane do płyty montażowej, dzięki czemu uzyskuje się stały i dokładny określony odstęp pomiędzy płytkami.

Przyklejone do płytek próbki zostały zamocowane w uchwycie uniwersalnej prasy wytrzymałościowej UTM 130 (patrz Rys. 3), tworząc układ gotowy do badania. Jego istota polega na cyklicznym rozciąganiu i ścisaniu przygotowanej próbki przyklejonej sztywno do płytek, co wywołuje w próbce naprzemiennie naprężenia rozciągające i ścisające. Badanie zostało przeprowadzone w trybie kontrolowanego odkształcenia. Długość pojedynczego cyklu obciążającego wynosiła 10 sekund, a maksymalne odkształcenie 0,63 mm. Temperatura badania wynosiła +25 ± 0,5°C. Każdy cykl składał się z 5 sekundowego obciążenia próbki i 5 sekundowego odciążenia (patrz Rysunek 4). Badanie trwało do chwili zniszczenia próbki. Za moment zniszczenia próbki uznawano liczbę cykli, przy której następowała redukcja począ-





1. Wymiary wyciętych próbek zgodnie z normą Tex-248-F [20]

Tab. 4. Zawartość wolnych przestrzeni w końcowych wyciętych próbkach

Rodzaj asfaltu	35/50	35/50 R	35/50 F	10/40-65	25/55-60	25/55-80
Zawartość wolnych przestrzeni [%]	5,3	5,4	5,2	5,3	5,2	5,1

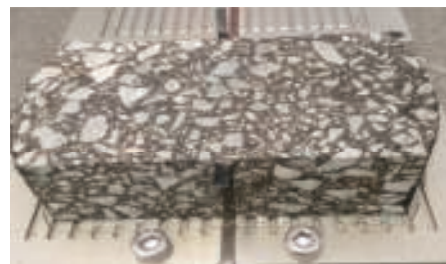
R - modyfikacja gumą, F - modyfikacja włóknami

kowej siły rozciągającej o 93%. Jeżeli 93% redukcja początkowej siły rozciągającej nie następowała podczas wstępnie założonej maksymalnej liczby cykli obciążenia badanie przerywano automatycznie. Początkowo maksymalny czas trwania badania określano na poziomie 1000 cykli obciążających, jednakże wartość ta musiała zostać zwiększona do 2000 cykli. Okazało się bowiem, że 1000 cykli obciążających nie wystarczało do wywołania uszkodzeń w badanych próbkach, zwłaszcza w przypadku mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem wysokomodyfikowanym. Po zakończonym badaniu wyznaczano początkową i końcową wartość obciążenia, procentową redukcję obciążenia oraz odnotowaną liczbę cykli do momentu wywołania pęknięcia.

Typowy wykres siły i odkształcenia podczas badania przedstawiono na Rysunku 4.

Jak można zauważyć, podczas pierwszego etapu obciążenia (pierwsze 5 sekund cyklu) próbka jest rozciągana, natomiast w drugim etapie (od 5 do 10 sekundy cyklu) następuje ściskanie próbki. Obciążenie potrzebne do zachowania stałej amplitudy odkształceń zmienia się podczas badania. W trakcie pierwszych cykli obciążających można zauważyć, że siła rozciągająca ma większą wartość niż siła ściskająca. Wraz z upływem kolejnych cykli siła rozciągająca zmniejsza się, siła przy ścisaniu pozostaje natomiast na stałym poziomie. Ściskanie podczas cykli obciążających może być uważane za formę samoregeneracji (ang. healingu) materiału.

Na podstawie obecnego kryterium opisanego w normie Tex-248-F, mieszanki mineralno-asfaltowe, które nie ulegną zniszczeniu podczas pierwszych 300



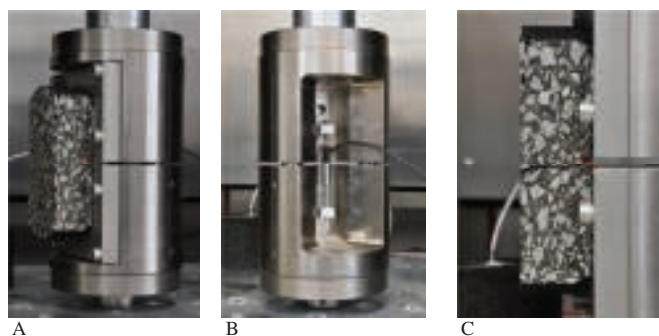
2. Wycięta próbka przyklejona do dwóch stalowych płytek przykręconych tymczasowo do płyty montażowej

cykli obciążających (tj. redukcja siły początkowej będzie mniejsza niż 93%) są uznawane za mieszanki o odpowiedniej odporności na pęknięcie [25]. Mieszanki mineralno-asfaltowe, dla których liczba cykli do zniszczenia wynosi powyżej 750 mogą być natomiast stosowane jako warstwa przeciwpękaniowa [8, 21]. W obecnej wersji normy Tex-248-F [20] liczba cykli do zniszczenia jest traktowana jedynie jako wartość informacyjna.

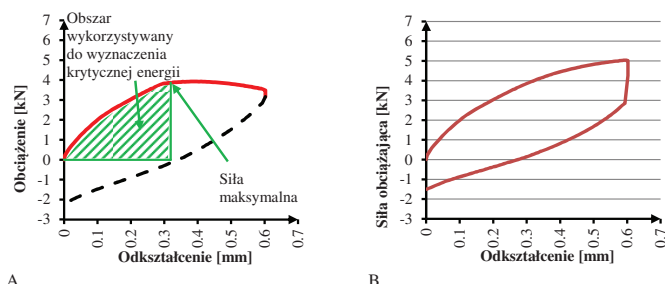
Na Rysunku 5 przedstawiono ideę wyznaczania krytycznej energii pęknięcia. Krytyczna energia pęknięcia jest definiowana jako obszar pod wykresem siły w zależności od odkształcenia (od zera do wartości maksymalnej) podczas pierwszego cyklu obciążającego [20].

Charakterystykę zachowania się mieszanki mineralno-asfaltowej w zakresie pęknięcia można opisać za pomocą Indeksu odporności na pęknięcie [20] oraz wskaźnika propagacji spękania [8], które oblicza się poprzez dopasowanie krzywej redukcji obciążenia opisaną równaniem wykładniczym.

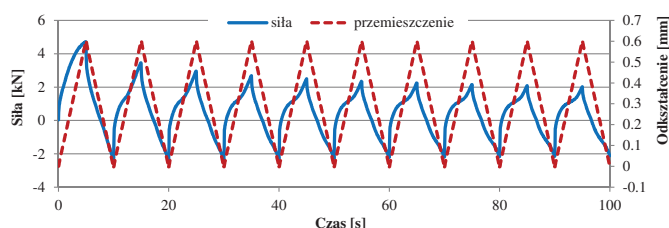
Według Garcia'i i in. [8] odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na pęka-



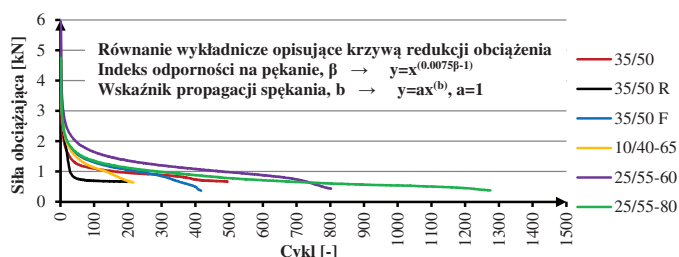
3. A - próbka badawcza zamontowana w prasie UTM 130, B - wewnętrzny czujnik przemieszczeń, C - pęknięta próbka po zakończonym badaniu



5. Prezentacja graficzna krytycznej energii pęknięcia podczas pierwszego cyklu obciążającego, A - idea metody, B - kształt pętli histerezy uzyskanej dla badanych mieszanek



4. Typowy wykres sił i odkształceń podczas badania (pierwsze 10 cykli)



6. Wykres sił obciążających dla poszczególnych mieszanek mineralno-asfaltowych (krzywe dla pierwszych wyników z serii; wybrane próbki)

nie można podzielić na cztery kategorie: I) Tough-crack resistant: dobra odporność podczas inicjacji pęknięć (wytrzymała) i ich propagacji (elastyczny). Do tej kategorii zalicza się mieszanki mineralno-asfaltowe o dopuszczalnej odporności na pęknięcie; II) Tough crack susceptible: mieszanki mineralno-asfaltowe o dobrej odporności na inicjację pęknięć (wytrzymała), ale podatne na ich propagację (kruche); III) Soft-crack resistant: łatwe inicjowanie pęknięć (słaby), ale dobra zdolność do zmniejszenia propagacji pęknięcia (elastyczny); IV) Soft-crack susceptible: mieszanki mineralno-asfaltowe o znacząco niskiej odporności na inicjację i propagację pęknięć. Ideę takiego podziału wraz z otrzymanymi wynikami badań zaprezentowano na Rysunku 8.

## Wyniki i analiza

Na Rysunku 6. przedstawiono wykresy sił obciążających w zależności od liczby cykli dla wszystkich badanych mieszanek mineralno-asfaltowych. Natomiast na Rysunku 7. zaprezentowano krzywe histerezy podczas pierwszego cyklu obciążającego. Wyniki z badania TxOT podsumowano w Tab. 5.

Na podstawie pierwszego kryterium (liczba cykli do zniszczenia) stwierdzono, że jedynie mieszanki mineralno-asfaltowe z asfaltem drogowym 35/50 z dodatkiem gumy oraz z asfaltem modyfikowanym 10/40-65 (który można uznać za twardy asfalt modyfikowany) nie spełniły wymagań zapisów normy Tex-248-F, ponieważ dla obu mieszanek liczba cykli do zniszczenia była mniejsza niż 300. Dodatek gumy do asfaltu drogowego 35/50 spowodował znaczny spadek liczby cykli do zniszczenia w porównaniu z czystym asfaltem 35/50, natomiast w przypadku dodatku włókien polimerowych do asfaltu 35/50 spadek wartości był niewielki, pomimo oczekiwanej poprawy, tj. wzro-

stu liczby cykli w porównaniu do mieszanki z czystym asfaltem 35/50.

W przypadku kryterium opartego na krytycznej energii pęknięcia można zauważyć, że najniższą wytrzymałość na spękanie uzyskano dla mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem wysokomodyfikowanym 25/55-80, a najwyższą zaobserwowano w przypadku mieszanki z asfaltem 35/50, ale z dodatkiem gumy.

W przypadku trzeciego kryterium charakteryzującego mieszanki mineralno-asfaltowe pod względem odporności na propagację pęknięcia, które już nastąpiło, najlepsze wyniki osiągnięto dla mieszanki z asfaltem modyfikowanym polimerem 25/55-60. Najgorsze wyniki uzyskano dla mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem drogowym 35/50 i dodatkiem gumy. Można jednak stwierdzić, że wszystkie wyniki osiągnięte dla tego kryterium (kombinacja odporności na inicjację spękania i jego propagację) były dobre dla wszystkich mieszanek mineralno-asfaltowych i można je uznać za posiadające dobre właściwości przeciwspekaniowe. Należy również zauważyć, że współczynnik zmienności (COV) był niski i na akceptowalnym poziomie dla wartości obliczonych w drugim i trzecim kryterium, podczas gdy współczynnik zmienności dla liczby cykli do zniszczenia (który był stosowany w pierwszym kryterium) był zdecydowanie wyższy (patrz Tabela 5). Na Rysunku 8 Przedstawiono interpretację graficzną właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych na inicjację i propagację spękania.

## Wnioski

Rodzaj asfaltu zastosowanego w poszczególnych mieszankach mineralno-asfaltowych miał znaczący wpływ na ich odporność na pęknięcie.

Asfalt modyfikowany 25/55-60 i asfalt wysokomodyfikowany 25/55-80 zwią-

zyły odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na pęknięcie. Mieszanki z dodatkiem tych lepszyczy osiągnęły najlepsze wyniki. Asfalt modyfikowany 10/40-65, który jest twardszy od asfaltów 25/55-60 i 25/55-80 osiągnął gorsze wyniki, nawet w porównaniu z asfaltem drogowym 35/50. W tym przypadku ogólna sztywność lepszycza była odpowiedzialna za zmniejszenie właściwości przeciwspekaniowych.

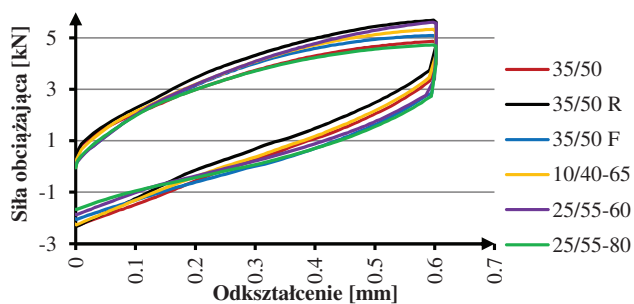
Mieszanka mineralno-asfaltowa z asfaltem modyfikowanym 25/55-60 osiągnęła wyższą wartość krytycznej energii pęknięcia i większą odporność na propagację spękania niż mieszanka z asfaltem wysokomodyfikowanym 25/55-80. Natomiast druga mieszanka uzyskała lepszy wynik w przypadku kryterium liczby cykli do pęknięcia.

Dodatek włókien polimerowych nie wpłynął pozytywnie na poprawę właściwości. Natomiast dodatek gumy obniżył właściwości przeciwspekaniowe. Mieszanka mineralno-asfaltowa z asfaltem drogowym 35/50 modyfikowana gumą w większości przypadków w opisywanym badaniu wykazała gorsze parametry niż z samym asfaltem 35/50.

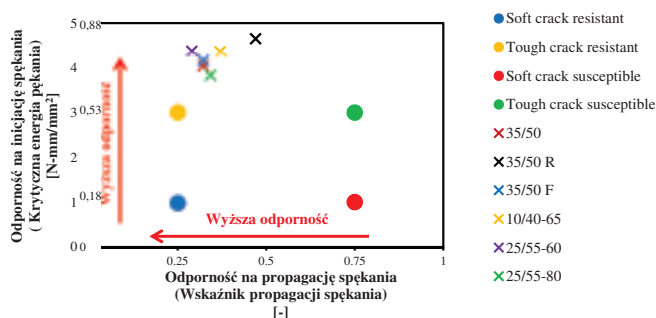
Na podstawie otrzymanych rezultatów można przedstawić następujący ranking mieszanek mineralno-asfaltowych i ich odporności na pęknięcie: 1 (najlepsza odporność) - 25/55-80 i 25/55-60, 2- 35/50 i 35/50 F, 3- 10/40-65, 4 (najniższa odporność)- 35/50 R. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] AASHTO M 320 2010 Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder American Association of State Highway and Transportation Officials
- [2] ASTM WK26816 2009 New Test Method for Determining the Susceptibility of Asphalt Mixtures to Cracking Using the Overlay Teste



7. Pętla histerezy dla pierwszego cyklu obciążającego, wartości średnie z trzech próbek badawczych



8. Interpretacja graficzna odporności na pęknięcie i wyniki badań



**Tab. 5.** Podsumowanie wyników badania TxOT, wartości średnie z trzech próbek badawczych

Rodzaj asfaltu	35/50	35/50 R	35/50 F	10/40-65	25/55-60	25/55-80
<b>Siła początkowa,</b>						
wartość średnia, [kN]	4,862	5,684	5,094	5,374	5,607	4,726
odch. standardowe [kN]	0,155	0,038	0,132	0,115	0,314	0,324
wsp. zmienności COV, [%]	3,2	0,7	2,6	2,1	5,6	6,9
<b>Cykle do zniszczenia,</b>						
wartość średnia, [-]	552	120	433	241	854	1069
odch. standardowe	131	69	102	24	470	203
wsp. zmienności COV, [%]	26,7	57,5	23,7	9,8	55,0	19,0
<b>Krytyczna energia pęknięcia, GC</b>						
wart. średnia, [kN-mm/mm <sup>2</sup> ]	0,705	0,815	0,727	0,764	0,765	0,668
odch. stand. [kN-mm/mm <sup>2</sup> ]	0,029	0,016	0,016	0,038	0,022	0,038
wsp. zmienności COV, [%]	4,1	2,0	2,1	5,0	2,9	5,7
<b>Indeks odporności na spękanie, <math>\beta</math>, (wskaźnik propagacji spękania)</b>						
wartość średnia, [-]	0,32	0,47	0,32	0,37	0,29	0,34
odch. standardowe	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,05
wsp. zmienności COV, [%]	3,26	4,05	2,40	3,46	1,77	6,97

[3] Chomicz-Kowalska A 2017 Laboratory testing of low temperature asphalt concrete produced in foamed bitumen technology with fiber reinforcement Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences 65.6 (2017): 779-790

[4] EN 12697-31 2007 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Specimen preparation by gyratory compactor

[5] EN 12697-35 2016 Bituminous mixtures. Test methods. Laboratory mixing

[6] EN 13108-1 2006 Bituminous mixtures. Material specifications. Asphalt Concrete

[7] Garcia V M et al. 2016 Evaluation of Operational Variables That Can Improve Overlay Tester Results Transportation Research Board 95th Annual Meeting Washington D.C. p 1-16

[8] Garcia V M et al. 2017 Improved Overlay Tester for Fatigue Cracking Resistance of Asphalt Mixtures Research Center for Transportation Infrastructure Systems The University of Texas at El Paso p 176

[9] Germann F P and Lytton R L 1979 Methodology for predicting the reflection cracking life of asphalt concrete overlays Research Report Number 207-5 Texas Transportation Institute Texas A&M University p. 149

[10] Iwanski M, Buczynski P and Mazurek G 2016 Optimization of the road binder used in the base layer in the road

construction Construction and Building Materials Vol. 125 30 p. 1044-1054 <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.112>

[11] Jaskula P, Stienss M and Szydłowski C 2017 Effect of Polymer Fibres Reinforcement on Selected Properties of Asphalt Mixtures Procedia Engineering, Volume 172, p 441-448

[12] Kaloush K E et al. 2010 Evaluation of Fibre-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Material Characterization Tests J. Test. Eval. vol. 38 no. 4 p. 102442

[13] Król J B et al. 2014 Laboratory and Field Investigations of Polymer and Crumb Rubber Modified Bitumen Journal of Civil Engineering and Architecture V8, 10 (83) pp. 1327-1334

[14] Polish Technical Guidelines WT-2 2014 General Directorate for National Roads and Motorways

[15] Pszczola M et al. 2017 Evaluation of Low Temperature Properties of Rubberized Asphalt Mixtures Procedia Engineering Vol. 172 p 897-90

[16] Radziszewski P. et al. 2012 Asphalt rubber as an alternative of polymer modified bitumen Asphalt Rubber Conference 2012 Munich

[17] Swieczko-Zurek B et al. 2017 Rolling resistance and tyre/road noise on rubberised asphalt pavement in Poland Road Materials and Pavement Design Vol. 18 Issue 1 p. 151-167 <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2016.1159245>

[18] Sybilski D et al. 2011 Rubber-bitumen

granulate for asphalt pavements – laboratory comparative analysis 5th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements Thessaloniki pp. 1413-1421

[19] TxDOT Designation 2014 Tex-248-F Test Procedure for Overlay Test Texas

[20] TxDOT Designation 2017 Tex-248-F Test Procedure for Overlay Test Texas

[21] Walubita L F et al. 2011 Search for a Laboratory Test to Evaluate Crack Resistance of Hot-Mix Asphalt Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board p 73-80 DOI: 10.3141/2210-08

[22] Walubita L F, Simate G S, and Oh J H 2010 Characterising the ductility and fatigue crack resistance potential of asphalt mixes based on the laboratory direct tensile strength test J. SOUTH AFRICAN Inst. Civ. Eng. vol. 52 no. 2 p 31-40

[23] Zborowski A. et al. 2004 Material Characteristics of Asphalt Rubber Mixtures Annual Meeting of the Transportation Research Board

[24] Zhou F and Scullion T 2003 Upgraded overlay tester and its application to characterize reflection cracking resistance of asphalt mixtures Report 0-4467-1 Texas Transportation Institute Texas A&M University p 44

[25] Zhou F and Scullion T 2005 Overlay tester: a rapid performance related crack resistance test Report 0-4467-2 Texas Transportation Institute Texas A&M University p 86

[26] Zhou F et al. 2016 Experimental Design for Field Validation of Laboratory Tests to Assess Cracking Resistance of Asphalt Mixtures Texas Transportation Institute Texas A&M University Project no 9-87 p 262

[27] Zhu Y et al. 2017 Comprehensive evaluation of low-temperature fracture indices for asphalt mixtures Road Materials and Pavement Design 18:sup4 pp. 467-490 DOI: 10.1080/14680629.2017.1389085

[28] Zofka A. et al. 2017 Glass and carbon geogrid reinforcement of asphalt mixtures Road Materials and Pavement Design Vol. 18(1), pp: 471-490, 10.1080/14680629.2016.1266775

[29] Pszczola M., Ryś D., Jaskuła P., Analysis of climatic zones in Poland with regard to asphalt performance grading, Drogi i Mosty, vol. 16, nr 4, 2017, s. 245-269, doi: 10.7409/rab-dim.017.016