

PAVLA VACKOVÁ¹⁾JAN VALENTIN²⁾

COMPARISON OF FRACTURE PARAMETERS OBTAINED FROM MODIFIED SEMI-CIRCULAR BENDING (SCB) TEST

PORÓWNANIE PARAMETRÓW MECHANIKI PĘKANIA UZYSKANYCH Z BADAŃ PRÓBEK PÓŁWALCOWYCH ZMODYFIKOWANĄ METODĄ SCB

STRESZCZENIE. Przez kilka lat na Politechnice Czeskiej w Pradze gromadzono i poddawano ocenie dane z badań propagacji spękań mieszanek mineralno-asfaltowych prowadzonych zgodnie z normą CSN EN 12697-44. Z czasem dokonano adaptacji standardowej procedury badawczej do warunków technicznych, specyficznych dla Republiki Czeskiej – z uwzględnieniem sposobu zagęszczenia próbek, dostępności tarcz tnących odpowiedniej grubości, średnicy próbek, prędkości obciążenia itp. Zmodyfikowano także niektóre spośród warunków wykonywania badania, jak również procedury zapisu i późniejszej oceny danych pierwotnych. Stopniowo ustalono, że charakterystyczne dla normy europejskiej skupienie się wyłącznie na zagadnieniu odporności na pękanie jako jedynym parametrem umożliwiającym ocenę jakościową jest najprawdopodobniej niewłaściwe, a co najmniej nieskuteczne. Wprowadzono i poddano dalszej analizie parametry związane z energią pękania.

SŁOWA KLUCZOWE: badanie SCB, mieszanki mineralno-asfaltowe, moduł sztywności, właściwości niskotemperaturowe, zginanie próbki półwalcowej.

ABSTRACT. For several years the crack propagation test data of asphalt mixtures according to CSN EN 12697-44 have been collected and evaluated at the Czech Technical University in Prague. Over time, the standardised test procedure has been adapted to better suit the conditions and practice typical of the Czech Republic – in terms of test specimen compaction, availability of cutting discs of suitable thickness, diameter of test specimens, loading speed etc. Modifications encompassed some of the test conditions as well as the procedures of data logging and subsequent evaluation of raw data. It has also been gradually established that the strict focus on fracture toughness, assumed by the European standard to be used as the only suitable qualitative parameter, is probably incorrect, or at least ineffective. The characteristics of fracture energy have been introduced and further studied.

KEYWORDS: mineral-asphalt mixtures, low-temperature properties, SCB test, semi-circular bending test, stiffness modulus.

DOI: 10.7409/rabdim.021.011

¹⁾ Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Road Structures, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, Czech Republic; pavla.vackova@fsv.cvut.cz (✉)

²⁾ Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Road Structures; jan.valentin@fsv.cvut.cz

1. WSTĘP

Zachowanie mieszanek mineralno-asfaltowych w zakresie niskich wartości temperatury może być badane za pomocą różnych metod laboratoryjnych, np. zginania dwu-, trzy- i cztero-punktowego, rozciągania próbek tarczowych (DCT), wytrzymałości na rozciąganie pośrednie (IDT), zginania próbek półwałcowych (SCB) czy badania naprężenia termicznego na skrepowanej próbce (TSRST) [1]. Metody te różnią się pod względem kształtu stosowanych próbek, temperatury badania, niezbędnego sprzętu, określanych parametrów itd.

W ostatnich latach bardzo popularne stało się badanie zginania próbek półwałcowych (test SCB), zapewne głównie ze względu na kształt próbek oraz fakt, że badanie nie wymaga zastosowania nazbyt złożonej aparatury, co ograniczałoby liczbę laboratoriów mogących je przeprowadzić. Co więcej, procedura jest nieskomplikowana, a wymagany czas badania – krótszy niż w wielu innych metodach. Schemat badania SCB opiera się na zginaniu trzypunktowym próbki półwałcowej z nacięciem na spodzie. Badanie cieszy się coraz większą popularnością na całym świecie – jest szeroko stosowane w USA, zaś w ostatnich latach w Azji i Europie pojawiły się odwołujące się do niego prace naukowe i normy techniczne.

Spękania należą do najistotniejszych uszkodzeń wpływających na pracę nawierzchni drogowych. Spękania mogą być spowodowane przez wielokrotne obciążenia (zmęczenie) lub przez temperaturę (spękania niskotemperaturowe). W niskich temperaturach warstwy asfaltowe częściej zachowują się jak materiał kruchy, a ryzyko nagłego spękania wzrasta.

Niskie wartości temperatury powodują skurcz warstw asfaltowych, a w następstwie – wzrost naprężeń rozciągających, które zwiększają się przy spadku temperatury lub nagłych jej wachaniach. Gdy naprężenia przekroczą wytrzymałość na rozciąganie, powstaje spękanie na powierzchni najwyższej warstwy. Ze względu na wnikanie wody i powtarzające się cykle zamarzania/odmarzania, spękanie propaguje w głąb pozostałych warstw i rozszerza się (spękanie typu „góra-dół”). W przeciwieństwie do deformacji trwałych, uszkodzenia tego rodzaju często nie są postrzegane jako krytyczne, choć mogą mieć równie negatywny wpływ na okres eksploatacji drogi, zwłaszcza, jeśli nie zostaną usunięte odpowiednio wcześniej.

Lu et al. [2] zestawili wyniki badań laboratoryjnych i symulacji numerycznych przeprowadzonych metodą elementów dyskretnych, aby zbadać przydatność badania SCB z zastosowaniem niestandardowych próbek średnicy 100 mm. W badaniu wykorzystano próbki z nacięciami różnych głębokości (od 5 mm do 15 mm) zagęszczone ubijakiem. Półwałcowe próbki średnicy 100 mm zastosowali również Vidal et al. [3]. Autorzy opisali badanie Fenix, w którym próbki są obciążane

1. INTRODUCTION

The behaviour of asphalt mixtures in the range of low temperatures can be determined by a number of different experimental tests, e.g. two-, three- or four-point bending tests, disk-shaped compact tension test (DCT), indirect tension test (IDT), semi-circular bending test (SCB) or thermal stress restrained tests (TSRST) [1]. These tests differ in the shape of used specimens, testing temperatures, required equipment, determined parameters etc.

Lately, semi-circular bending test (SCB test) has become very popular, probably mainly because cylindrical specimens are used and the test itself does not require specific test apparatus which would be available only to a limited number of laboratories. Moreover, performance of the test procedure is uncomplicated and the required testing time is short compared to some of the other tests. The principle of the SCB test is three-point bending of a semi-circular specimen with notch on the bottom edge. The test is now gaining worldwide popularity – it is commonly used in the United States, but in the last few years it has been referred to in Asian or European research studies and technical standards as well.

Cracking is one of the major failures that affect the long-term performance of asphalt pavement structures. Cracking can be caused by traffic load repetitions (fatigue) or, more often, by low temperatures (temperature-induced). At low temperatures, asphalt pavements often behave like brittle material and the risk of sudden fracture increases.

Low temperatures cause shrinkage of asphalt layers and a consequent increase in tensile stress. Tensile stress increases when temperature decreases or when surface temperature changes rapidly. When the stress reaches the tensile strength, a crack is formed on the top of surface layer. Due to repeating thaw-freeze cycles and water immersion, the crack propagates to remaining layers of the structure and widens (so called “top-down” cracking). In contrast to permanent deformation, this type of failure is often not perceived as critical, although it may have similar negative impact on service life of the road, especially when it is not rehabilitated in time.

Lu et al. [2] compared laboratory test method and DEM numerical simulation to investigate the applicability of the SCB test using non-standardised samples of 100 mm diameter. The research used specimens compacted in an impact compactor with different notch lengths (5 mm to 15 mm). Semi-circular specimens with 100 mm diameter were also used in Vidal et al. [3]. Authors described the Fenix test,

przeciwnie działającymi siłami. Porównano mieszanki zawierające lepiszcza i kruszywa z różnych źródeł. Omranian et al. [4] przedstawili wskaźniki uzyskane z badań SCB stosowane w różnych normach i krajach. W badaniu zastosowano niektóre nowe wskaźniki i poddano je ocenie. Nsengiyumva [5] porównał różne prędkości przyrostu przemieszczenia (od 1 mm/min do 5 mm/min), różne głębokości nacięcia (od 5 mm do 25 mm) oraz różne temperatury badawcze (od 15 °C do 40 °C). Eksperymentował również z grubością próbki (od 40 mm do 60 mm) w poszukiwaniu najdokładniejszej metody. Na podstawie uzyskanych wyników Lui et al. [6] stwierdzili, że odporność na pękanie K_c jest mniej przydatna w ocenie mieszanek asfaltowych niż energia pęknięcia (całka J_c), która lepiej odzwierciedla mechanikę pęknięcia mieszanki asfaltowej.

2. BADANIE ZGINANIA PRÓBKII PÓŁWALCOWEJ (SCB) I JEGO MODYFIKACJE

Na Politechnice Czeskiej w Pradze opracowano zmodyfikowaną metodę SCB, która oparta jest wprawdzie na normie EN 12697-44 [7], lecz zakłada użycie próbek innej średnicy, określenie większej liczby parametrów, zastosowanie mniejszej prędkości przyrostu przemieszczenia (2,5 mm/min) oraz innej szerokości nacięcia – tym samym stanowi ona kombinację różnych metod i podejść [8, 9].

Modyfikacji metody dokonano przede wszystkim w celu dostosowania jej do praktyki, uwarunkowań technicznych i najczęściej stosowanego sprzętu w Czechach, włączając czynniki takie jak dostępność diamentowych tarcz tnących o odpowiednich wymiarach. Metoda ta jest stosowana na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki w Pradze już od wielu lat. Na Rys. 1 przedstawiono sprzęt badawczy i jego geometrię.

where specimens are loaded by opposite forces. Asphalt mixtures containing binders and aggregates from different sources were compared. Omranian et al. [4] present various SCB indicators used in different standards and countries. The paper implements some of the new indicators and evaluates them. Nsengiyumva [5] compared different loading rates (from 1 mm/min to 5 mm/min), different notch lengths (from 5 mm to 25 mm) and testing temperatures (from 15°C to 40°C). He also experimented with specimen thickness (from 40 mm to 60 mm) to find the most accurate method. Lui et al. [6] concluded from their results that fracture toughness K_c is less suitable for asphalt mixture evaluation than fracture energy (J_c integral), which defines the asphalt mixture cracking performance better.

2. SEMI-CIRCULAR BENDING TEST (SCB TEST) AND ITS MODIFICATIONS

The Czech Technical University (CTU) in Prague invented a modified SCB test, which is based on the standard EN 12697-44 [7], but modifies the diameter of test specimens, extends the scope of the assessed test parameters, defines lower loading rate (2.5 mm/min) and uses different notch width, thus combining different test methods and approaches [8, 9].

The method was primarily modified to correspond with the Czech technical practice, conditions and commonly used laboratory equipment, including aspects such as availability of suitable diamond cutting blades. The method has been used at the Faculty of Civil Engineering, CTU in Prague for many years. The test equipment and its geometry is shown in Fig. 1.

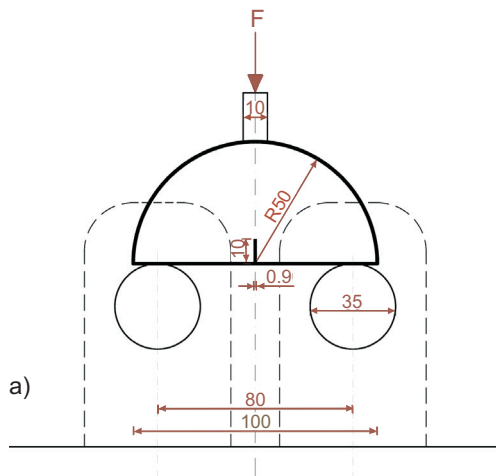


Fig. 1. Modified semi-circular bending test (SCB test): a) geometry of equipment, b) view of measuring devices

Rys. 1. Zmodyfikowany test zginania próbki półkolistej (SCB): a) geometria sprzętu badawczego, b) widok urządzeń pomiarowych

Badanie pozwala na zebranie o badanych mieszankach mineralno-asfaltowych informacji wykraczających poza typowy zestaw właściwości wymaganych w projektowaniu mieszanek. Zasadniczo analiza zachowania mieszanek asfaltowych w niskich temperaturach czy związanych z nim parametrów nie jest wymagana ani przez czeskie normy dotyczące materiałów asfaltowych, ani przez wykonawców, nie istnieje więc ustandaryzowana metodologia ich oceny.

Norma EN 12697-44 wymaga użycia próbek o średnicy 150 mm zagęszczonych zgodnie z EN 12697-31 w prasie żyratorowej. W zmodyfikowanej metodzie zmieniono ten wymóg, uwzględniając charakter próbek stosowanych zwykle w Republice Czeskiej. Zagęszczone ubijakiem Marshalla próbki (wg EN 12697-30) o średnicy 100 mm są szeroko stosowane do określania zawartości wolnych przestrzeni, badania stabilności metodą Marshalla oraz badania sztywności (metodą IT-CY). Zagęszczanie próbek w prasie żyratorowej nie było nigdy praktykowane w Czechach (ani ogólnie w Europie Środkowej) na szerszą skalę. W związku z tym problematyczne byłoby narzucanie użycia takiej procedury zagęszczenia w badaniach innych parametrów wymienionych w normach dotyczących opisu materiałów. Do badań właściwości mieszanek oraz badań kontrolnych laboratorium standardowo stosują próbki Marshalla. Próbki tego samego rodzaju stosowane są w pracach badawczych czy w optymalizacji projektów zawiązanych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Kolejnym wymogiem normy EN 12697-44 jest grubość próbki półwałcowej, która powinna wynosić 50 mm. Wymagana grubość osiągana jest przez docinanie próbek piłą laboratoryjną. Po odpowiednim ograniczeniu grubości cylindryczne próbki przecinane są na pół wzdłuż średnicy. Cięcia muszą być wykonane precyzyjnie, centrycznie oraz z zachowaniem prostokątności i równoległości odpowiednich płaszczyzn. Wszelkie niedokładności mogą negatywnie wpłynąć na wyniki. Jeśli niedokładności pojawiają się na dolnej płaszczyźnie próbki, najsłabszy punkt może wystąpić poza nacięciem, a wyniki badania mogą okazać się niezadowolające – uzyskany wykres siły w zależności od przemieszczenia może mieć nielogiczny i nierówny kształt.

Jak wspomniano wcześniej, w dolnej powierzchni próbki wykonuje się nacięcie o zadanej geometrii. Nacięcie ma głębokość 10 mm i szerokość 0,9 mm, co stanowi kolejną różnicę między metodą zmodyfikowaną a normową. Norma EN 12697-44 wymaga nacięcia o szerokości 0,35 mm, w zmodyfikowanej metodzie szerokość tę jednak zwiększono na podstawie długoterminowego monitoringu wykonywanych badań, głównie ze względu na problemy z nabyciem w Europie odpowiednio cienkich diamentowych tarcz tnących oraz ze względu na ich szybkie zużycie. Diamentowe tarcze tnące

The test is used to extend the knowledge of the tested asphalt mixtures beyond the regular set of characteristics which are required for asphalt mix design. In general, analysis of behaviour of asphalt mixtures in the range of low temperatures and related properties are required neither by the Czech asphalt mix product standards nor by contractors, so there is no standardised methodology of their evaluation.

The standard EN 12697-44 requires test specimens with 150 mm diameter compacted according to EN 12697-31 in gyratory compactor. This requirement has been changed due to the character of test specimens used normally in the Czech Republic. The Marshall test specimens (compacted according to EN 12697-30 in impact compactor) with 100 mm diameter are commonly prepared for determination of air voids content, for Marshall test or stiffness (IT-CY method) test. Compaction of specimens with gyratory compactor has never been widely used in the Czech Republic (and in the entire Central Europe). Therefore, it would be problematic to enforce such a procedure with respect to other parameters given by the standards for material specification. Laboratories normally use Marshall test specimens for asphalt mix type testing and control tests. This type of specimens is also used in research studies and in optimization of advanced asphalt mix designs.

Another requirement according to the standard EN 12697-44 is the thickness of the semi-circular specimen, which shall be 50 mm. The required thickness of 50 mm is achieved by cutting specimens with laboratory saw. Afterwards, the specimens are cut in half along the diameter. The cuts must be performed precisely, parallel and centrically. Any inaccuracies can negatively affect the test results. If the specimen has inaccuracies on the bottom surface, the weakest spot can occur outside of the notch and the test results can become unsatisfactory – the force-displacement diagram may have illogical and uneven shape.

As stated above, the defined notch is cut on the bottom. The notch has the depth of 10 mm and the width of 0.9 mm, which is another difference from the standardised method. The standard EN 12697-44 requires the notch width of 0.35 mm, but the width has been increased in the modified method based on the performed long-term monitoring, mainly due to problems with obtaining suitably thin diamond cutting blades in Europe and fast wear of such blades. Diamond cutting blades that enable cutting a notch of 0.9 mm are produced in the Czech Republic and their life is at least 5 times longer than that of the blades

umożliwiający wycięcie szczeliny o szerokości 0,9 mm są produkowane w Czechach, a ich żywotność jest co najmniej pięciokrotnie większa niż tarcz przewidzianych w normie. Na podstawie wymagań przedstawionych przez autorów lokalny producent takich tarcz był nawet w stanie poprawić stosowane materiały, osiągając jeszcze wyższą żywotność produktu. Szerokość nacięcia większa od normowej jest stosowana w wielu innych zmodyfikowanych procedurach SCB; w różnych pracach badawczych można spotkać się z szerokościami nacięcia wynoszącymi nawet do 6 mm (np. [2, 4, 10]). Zazwyczaj im większa jest stosowana głębokość nacięcia, tym większa szerokość. Jeśli raz założona szerokość nacięcia nie ulega zmianie w obrębie całej pracy eksperymentalnej, nie jest konieczne dokonywanie poprawek w obliczeniach odporności na pęknięcie. Co oczywiste, ewentualna zmiana szerokości wykonywanej szczeliny w trakcie pracy badawczej mogłaby negatywnie wpłynąć na wyniki i wymagałaby odpowiedniego zmodyfikowania obliczeń.

Ostatnią zmianą w porównaniu z metodą normową jest obniżenie prędkości przyrostu przemieszczenia. Norma EN 12697-44 wymaga prędkości 5,0 mm/min. W początkach prac z metodą zmodyfikowaną stosowano prędkość przyrostu przemieszczenia przewidzianą w normie. W późniejszych pomiarach prędkość tę zredukowano stopniowo aż do poziomu 1 mm/min, ostatecznie zaś zdecydowano się na 0,5 mm/min [11, 12]. Pierwotnie obniżenie prędkości przyrostu przemieszczenia związane było z próbą uzyskania lepszej korelacji między różnymi metodami stosowanymi do oznaczania właściwości niskotemperaturowych (modułu sztywności, wytrzymałości na zginanie itp.). Później kolejnym argumentem przemawiającym za obniżeniem prędkości obciążenia stała się potrzeba uzyskania zadowalającej zależności pomierzonych parametrów od temperatury (nawet powyżej 0°C). W niniejszej pracy zastosowana obniżona prędkość przyrostu odkształceń najistotniejsza była przede wszystkim z perspektywy uzyskania warunków obciążenia maksymalnie zbliżonych do realnych warunków pracy mieszanki w nawierzchni, w których zawsze pomiędzy kolejnymi obciążeniami następują przerwy. Niemniej jednak należy zaznaczyć, że nawet obniżenie prędkości przyrostu przemieszczenia nie pozwala na istotną relaksację próbki i nie odzwierciedla pracy materiału w zakresie lepkości liniowej.

Prędkość przemieszczenia w badaniu SCB przyjmowana jest na różnych poziomach nie tylko w zależności od regionu geograficznego (Europa, Azja, USA itd.), ale również od temperatury badania. Zakres prędkości przyrostu przemieszczenia w różnych wymogach normowych zazwyczaj wynosi od 0,5 mm/min (np. ASTM D8044-16 [13]) do 50 mm/min (np. AASHTO TP105-13 [14]) i często zależy od temperatury

wymaganej przez standard. Na podstawie wymagań podanych przez autorów, lokalny producent takich tarcz był nawet w stanie poprawić materiały użyte do dalszego zwiększenia żywotności tarczy. Większa szerokość nacięcia jest używana w wielu innych zmodyfikowanych procedurach SCB; szerokości nacięcia nawet do 6 mm można znaleźć w różnych badaniach (np. [2, 4, 10]). Zazwyczaj im większa jest długość nacięcia, tym większa jest szerokość. Jeśli szerokość nacięcia jest taka sama przez cały czas trwania pracy eksperymentalnej, nie ma potrzeby korekt obliczeń wytrzymałości. Oczywiście, zmiana szerokości nacięcia może mieć negatywny wpływ na wyniki i powinna być uwzględniona w zmodyfikowanych obliczeniach.

Ostatnią zmianą w porównaniu z standardizowaną metodą było zmniejszenie prędkości obciążenia. Norma EN 12697-44 wymaga prędkości 5,0 mm/min. W początkowych implementacjach zmodyfikowanej metody standardizowaną prędkość obciążenia używano. Prędkość obciążenia została później zmodyfikowana i zmniejszona w sekwencyjnych krokach do poziomu 1 mm/min, ostatecznie zdecydowano się na 2,5 mm/min [11, 12]. Prędkość obciążenia została najpierw zmniejszona w celu uzyskania lepszej korelacji z różnymi metodami używanymi do wyznaczania właściwości (modułu sztywności, wytrzymałości itp.). Później kolejnym powodem zmniejszenia prędkości obciążenia było uzyskanie wystarczającej zależności pomierzonych parametrów od temperatury (nawet powyżej 0°C). W niniejszym badaniu niższa prędkość obciążenia jest ważniejsza z punktu widzenia uzyskania warunków obciążenia, które mogłyby być podobne do rzeczywistych warunków w strukturze nawierzchni, gdzie zawsze występuje przerwa między kolejnymi cyklami obciążenia. Jednak należy stwierdzić, że nawet zmniejszenie prędkości obciążenia nie pozwala na istotną relaksację próbki i nie odzwierciedla jej rzeczywistej wydajności w zakresie lepkości liniowej.

Prędkość obciążenia w badaniu SCB różni się nie tylko w zależności od regionu geograficznego (Europa, Azja, USA i inne), ale także od temperatury badania. Zakres prędkości obciążenia w różnych standardach jest zwykle podany od 0,5 mm/min (np. ASTM D8044-16 [13]) do 50 mm/min (np. AASHTO TP105-13 [14]) i jest często zależny od temperatury badania. Niższe lub wyższe prędkości obciążenia są wyjątkowo używane w pracach badawczych lub w połączeniu z niestandardizowanymi temperaturami. Według doświadczeń z ostatnich czterech lat, prędkość obciążenia 2,5 mm/min wydaje się optymalna dla zmodyfikowanych warunków testowania nawet przy wyższych temperaturach testowania w zakresie 15-25°C. Wszystkie modyfikacje są podsumowane w Tabeli 1.

badania. Niższe bądź wyższe prędkości przemieszczenia stosowane są sporadycznie w pracach badawczych lub w połączeniu z nienormowymi wartościami temperatury podczas badania. Na podstawie doświadczenia pozyskanego w ciągu ostatnich czterech lat prędkość przyrostu przemieszczenia 2,5 mm/min wydaje się optymalna do zastosowania w zmodyfikowanej procedurze badawczej nawet w wyższych wartościach temperatury – rzędu 15-25°C. Wszystkie wprowadzone modyfikacje zestawiono w Tabl. 1.

Table 1. Comparison of test methods
Tablica 1. Porównanie metod badawczych

		EN 12697-44 standard Norma EN 12697-44	Modified method Metoda zmodyfikowana
Test specimens / Próbkki	compaction / zagęszczenie	gyratory compactor (EN 12697-31) prasa żyratorowa (EN 12697-31)	impact compactor (EN 12697-30) ubijak (EN 12697-30)
	diameter / średnica [mm]	ϕ 150	ϕ 100
Notch / Nacięcie	depth / głębokość [mm]	10	10
	width / szerokość [mm]	0.35	0.90
Loading rate / Prędkość przyrostu przemieszczenia [mm/min]		5.0	2.5
Test temperature / Temperatura badania [°C]		0	0
Test parameter for evaluation / Parametr oceniany w badaniu		fracture toughness odporność na pękanie	fracture toughness odporność na pękanie fracture energy up to F_{max} energia pęknięcia do F_{max} total fracture energy całkowita energia pęknięcia

Poza parametrami przewidzianymi w standardowej procedurze według normy EN 12697-44 określono również nowe parametry. Normowymi parametrami są: przemieszczenie odpowiadające maksymalnej wartości siły, maksymalne naprężenie oraz odporność na pękanie (parametr oparty na mechanice pęknięcia). Wszystkie trzy parametry są związane z maksymalną wartością siły oraz przemieszczeniem odpowiadającym tej sile, tj. momentem inicjacji zniszczenia próbki (inicjacji pęknięcia).

Dodatkowo zarejestrowano przebieg badania w formie wykresu siła-przemieszczenie. Praca (mechaniczna) odczytana z wykresu F - δ jest interesująca pod kilkoma względami. Procedura normowa nie wymaga jej analizy, ponieważ uwzględnia jedynie maksymalną siłę oraz przemieszczenie – jednakże podczas optymalizacji procedury badawczej wielokrotnie wykazano, iż ocena danych jedynie z perspektywy siły maksymalnej (z zastosowaniem tylko parametru odporności na pękanie) może być w pewnym stopniu myląca.

Wykres siła-przemieszczenie posłużył do wyliczenia pracy pęknięcia W_f . Praca ta obliczana jest jako całka – pole pod wykresem siła-przemieszczenie. Obliczono pracę do dwóch momentów: 1) do punktu, w którym zarejestrowano maksymalną siłę (inicjacja pęknięcia); 2) do nastąpienia całkowitej propagacji pęknięcia. Śledzenie propagacji pęknięcia ustawało, gdy siła

Apart from the parameters defined in the standard procedure according to EN 12697-44, new parameters were determined. The standardised test parameters are: displacement at maximum force, maximum stress and fracture toughness (which is a parameter based on fracture mechanics). All the three parameters are related to the value of maximum force and displacement at this force, i.e. the moment when failure of the test specimen is initiated (crack initiation).

In addition, the course of the test was recorded and a force-displacement diagram was plotted. The (mechanical) work from the F - δ diagram is interesting in several aspects. The standardised procedure does not require its analysis because it considers only maximum force and displacement, but it has been repeatedly proven during optimization of the test procedure that evaluation of data only from the perspective of the maximum force (using only fracture toughness parameter) can be partially misleading.

The force-displacement diagram was used to calculate fracture work W_f . Fracture work is calculated as an integral of the force-displacement curve. Fracture work was determined at two stages: 1) up to the value of maximum force (crack initiation) and 2) up to the value of complete crack propagation. Crack propagation tracing was stopped when the force decreased to 0.3 kN (or 0.5 kN for asphalt mixtures with aggregate particle size ≥ 16 mm). At the initial phase of the research, this value was set more strictly at 0.1 kN, but the level established later was found to be fully satisfactory. In many cases these two fracture work values are equal, because the specimens show brittle fracture – a rapid decrease in stress immediately after crack initiation. Fig. 2 shows an example of force-displacement diagram with highlighted fracture works.

spadała do 0,3 kN (lub do 0,5 kN dla mieszanek o wymiarze największego ziarna kruszywa ≥ 16 mm). Na początkowym etapie prac badawczych wartość tę przyjęto bardziej restrykcyjnie jako 0,1 kN, jednakże ustalony później poziom okazał się w pełni wystarczający. W wielu przypadkach obie wartości pracy są równe, ponieważ próbki wykazują spękanie kruche – nagły spadek naprężeń natychmiast po inicjacji spękania. Rys. 2 przedstawia przykładowe wykresy siła-przemieszczenie z zaznaczonymi pracami pęknięcia.

Praca pęknięcia została później przeliczona na energię pęknięcia [J/m^2] poprzez podzielenie pracy pęknięcia przez pole pęknięcia, zgodnie z definicją stosowaną m.in w AASHTO TP 105 [14]:

$$G_f = \frac{W_f}{t \cdot (w - a)}, \quad (1)$$

gdzie:

W_f – praca pęknięcia (pole powierzchni pod krzywą F - δ) [J],

t – grubość próbki [m],

w – szerokość (promień) próbki [m],

a – głębokość nacięcia [m].

3. DANE EKSPERYMENTALNE

Podejście „europejskie” polega na ocenie wyników badania SCB na podstawie odporności na pęknięcie, tj. według siły maksymalnej oraz odpowiadającemu jej przemieszczeniu zarejestrowanym dla poszczególnych próbek przez urządzenie uniwersalne UTM lub zwykłą prasę. Podejście „amerykańskie” polega na ocenie badania SCB z punktu widzenia energii pęknięcia, tj. na analizie i interpretacji przebiegu badania. Nie ma „poprawnej” bądź „lepszej” metody oceny wyników badania SCB. Wybór sprowadza się raczej do kwestii rozważanych właściwości oraz stopnia złożoności gromadzonych danych o zachowaniu próbek.

W dalszej części artykułu przedstawione zostaną wyniki badania uzyskane dla różnych grup mieszanek asfaltowych wraz z ich oceną dokonaną za pomocą obu wyżej wymienionych podejść (odporności na pęknięcie oraz energii pęknięcia). Należy zaznaczyć, że wykorzystano zaledwie część istniejącej bazy danych zawierającej informacje o różnych zbadanych mieszanek asfaltowych. Dla każdego wariantu mieszanki asfaltowej i każdego badania SCB stosowano typowo 6 powtórzeń, aby uzyskać odpowiednie dane i wyniki.

Do analizy porównawczej wybrano trzy różne grupy mieszanek:

- 26 betonów asfaltowych do warstwy ścieralnej o maksymalnym rozmiarze ziarna kruszywa 11 mm – AC_{sur} 11,

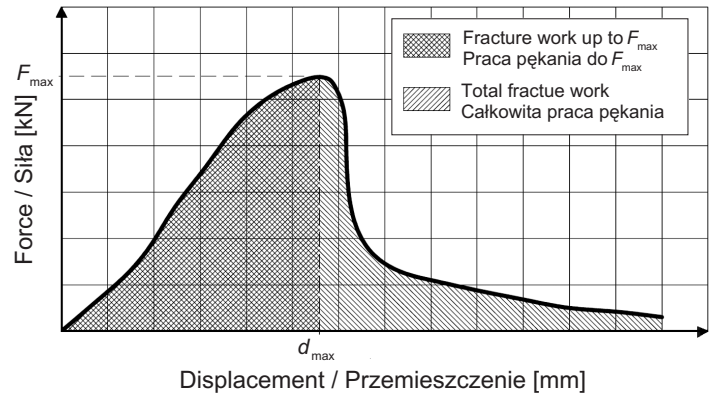


Fig. 2. Force-displacement diagram – principle of fracture work determination

Rys. 2. Wykres siła-przemieszczenie – zasada określenia pracy pęknięcia

Fracture work was further transformed to fracture energy [J/m^2] by dividing fracture work by fracture area as it is defined e.g. by AASHTO TP 105 [14]:

$$G_f = \frac{W_f}{t \cdot (w - a)}, \quad (1)$$

where:

W_f – fracture work (area under the F - δ curve) [J],

t – thickness of test specimen [m],

w – width (radius) of test specimen [m],

a – notch depth [m].

3. EXPERIMENTAL DATA

The “European” approach is to evaluate the SCB test from the point of view of fracture toughness, that is according to maximum force and displacement logged by the universal testing machine or a regular press machine for the test specimen. The “US” approach is to evaluate SCB test from the point of view of fracture energy, i.e. to analyse and interpret the course of the test. There is no “correct” or “better” way of SCB test evaluation. It is rather a question of what characteristics are considered and how complex the obtained information about behaviour of the test specimen.

The article will further show the results for different groups of asphalt mixtures and evaluate them using both approaches (fracture toughness as well as fracture energy). It should be pointed out that only a part of the existing database for different assessed asphalt mixtures was selected. It should be also stated that for each asphalt mixture variant and each SCB test 6 replicates were typically used to obtain appropriate data and results.

- 26 betonów asfaltowych do warstwy wiążącej o maksymalnym rozmiarze ziarna kruszywa 16 mm – AC_{bind} 16,
- 52 betony asfaltowe o wysokim module sztywności do warstwy podbudowy asfaltowej o maksymalnym rozmiarze ziarna 22 mm – HMAC 22 (w Polsce oznacz. ACWMS 22).

W poszczególnych grupach znalazły się mieszanki zawierające destrukta asfaltowy (do 40%), mieszanki zarówno z asfaltami drogowymi jak i z asfaltami modyfikowanymi różnych rodzajów, mieszanki zbrojone włóknami rozproszonymi itp. Zakres typów mieszanek objętych przez każdą z grup był możliwie najszerszy, aby uwzględnić wszystkie ewentualności. Celem niniejszego badania nie jest natomiast wytypowanie najlepszej mieszanki asfaltowej, lecz znalezienie możliwych korelacji i związków między odmiennymi podejściami stosowanymi w badaniach SCB.

Porównaniu poddano następujące parametry:

- moduł sztywności określony zgodnie z EN 12697-26 przez badanie pośredniego rozciągania (IT-CY) przy czasie przyrostu obciążenia 124 ms w temperaturze 15°C,
- odporność na pękanie określoną wg zmodyfikowanej procedury badawczej opartej na EN 12697-44:2010 (obliczenia pozostają bez zmian w stosunku do metody normowej),
- energię pękania określoną wg metody zmodyfikowanej.

Wszystkie wyznaczone parametry badawcze uzależnione są od projektu mieszanki – uziarnienia, zawartości lepiszcza, zawartości wolnych przestrzeni itd. Normowe wymogi dla mieszanek asfaltowych zestawione są w Tabl. 2.

Three different groups of mixtures were chosen for comparative analysis:

- 26 asphalt concrete mixtures for wearing course with maximum particle size of 11 mm – AC_{sur} 11,
- 26 asphalt concrete mixtures for binder course with maximum particle size of 16 mm – AC_{bind} 16,
- 52 high-modulus asphalt concrete mixtures for base course with maximum particle size of 22 mm – HMAC 22.

The individual groups included asphalt mixtures with reclaimed asphalt (up to 40%), paving grade bitumen and polymer-modified binders of different grades, as well as mixtures modified by reinforcement fibres etc. The range of the groups was wide to cover all the possibilities. The goal of the study is not to find the best asphalt mixture, but to find possible correlations or affinities between different test approaches.

The following parameters were compared:

- the stiffness modulus determined according to EN 12697-26 by repeated indirect tensile stress (IT-CY) at the rise time of 124 ms and the temperature of 15°C,
- the fracture toughness determined according to the modified test procedure based on EN 12697-44:2010 (the calculation remains the same as in the standardised method),
- the fracture energy determined according to the modified method.

All the determined test parameters are influenced by mix design – gradation, bitumen content, air voids etc. The product standard requirements for asphalt mixtures are summarized in Table 2.

Table 2. Requirements for asphalt mixture properties according to product standard ČSN 73 6121
Tablica 2. Wymagania dla mieszanek asfaltowych według normy ČSN 73 6121

Property Właściwość	AC_{sur} 11		AC_{bind} 16		HMAC 22	
	min	max	min	max	min	max
Bitumen content [%] Zawartość asfaltu	5.6	–	4.2	–	4.1	–
Air voids content – initial test [%] Zawartość wolnych przestrzeni – badanie początkowe	2.5	4.5	4.0	6.0	3.0	5.0
Air voids content – control test [%] Zawartość wolnych przestrzeni – badanie kontrolne	2.0	6.0	3.0	8.0	2.5	6.0
Stiffness modulus at 15°C [MPa] Moduł sztywności w 15°C	–	–	–	–	9000	–

Sztywność zazwyczaj wzrasta ze spadkiem zawartości wolnych przestrzeni, spadkiem zawartości lepiszcza i spadkiem penetracji zastosowanego asfaltu. Parametry opisujące odporność na pękanie zwykle ulegają poprawie po zastosowaniu asfaltów modyfikowanych (mieszanka z asfaltem drogowym

Stiffness usually increases with a decrease in air voids content, decrease in bitumen content and with a decrease in penetration of the bitumen used. Fracture parameters usually improve with modification of asphalt mixtures (i.e. asphalt mix with paving grade bitumen usually shows

zazwyczaj wykazuje niższe wartości niż mieszanki asfaltowe z lepiszczami modyfikowanymi polimerem), przy wzroście penetracji lepiszcza oraz przy wzroście jego zawartości. Charakterystyki statystyczne rozpatrywanych parametrów mieszank mineralno-asfaltowych zestawiono w Tabl. 3.

lower values than asphalt mixtures where polymer-modified bitumen is used), an increase in bitumen penetration and an increase in bitumen content. The statistical characteristics of presented parameters of asphalt mixtures are shown in Table 3.

Table 3. Statistical characteristics for mineral-asphalt mixture parameters

Tablica 3. Charakterystyki statystyczne pomierzonych parametrów mieszank mineralno-asfaltowych

Statistical characteristics Charakterystyki statystyczne	Stiffness at 15°C Sztwywność w 15°C [MPa]			Fracture toughness Odporność na pękanie [N/mm ^{3/2}]			Fracture energy till F_{max} Energia pękania do F_{max} [J/m ²]			Fracture energy Całkowita energia pękania [J/m ²]		
	AC _{sur} 11	AC _{bind} 16	HMAC 22	AC _{sur} 11	AC _{bind} 16	HMAC 22	AC _{sur} 11	AC _{bind} 16	HMAC 22	AC _{sur} 11	AC _{bind} 16	HMAC 22
Mean Średnia	9401	11027	11649	44.6	38.0	43.1	1094	794	935	1491	1155	1312
Standard error Błąd standardowy	564	600	443	0.9	1.2	0.9	67	36	33	92	60	51
Standard deviation Odchylenie standardowe	2583	2749	2940	4.7	6.0	6.4	333	167	233	461	279	364
Minimum Wartość minimalna	5554	6797	8306	37.2	28.6	29.6	558	438	421	711	742	613
Maximum Wartość maksymalna	13873	17183	19149	59.2	50.7	57.0	1988	1191	1370	2891	1944	2173
Range Rozstęp	8319	10386	10843	22.0	22.1	27.5	1430	753	949	2180	1203	1560
Number of mixtures Liczba mieszank	21	21	44	26	26	52	25	22	51	25	22	51

Odporność na pękanie i energia pękania określone były z zastosowaniem tej samej procedury badawczej w temperaturze 0°C. Korelacja między tymi parametrami (Rys. 3) jest stosunkowo wysoka we wszystkich trzech grupach mieszank ($R^2 \approx 0,6$). Wszystkie proste regresji liniowej wskazują na tę samą zależność – im wyższa odporność na pękanie, tym wyższa energia pękania.

Fracture toughness and fracture energy were determined using the same test procedure at the temperature of 0°C. The correlation between the parameters (Fig. 3) is relatively high for all three groups ($R^2 \approx 0.6$). All of the linear trend lines have the same interpretation – higher fracture toughness results in higher fracture energy.

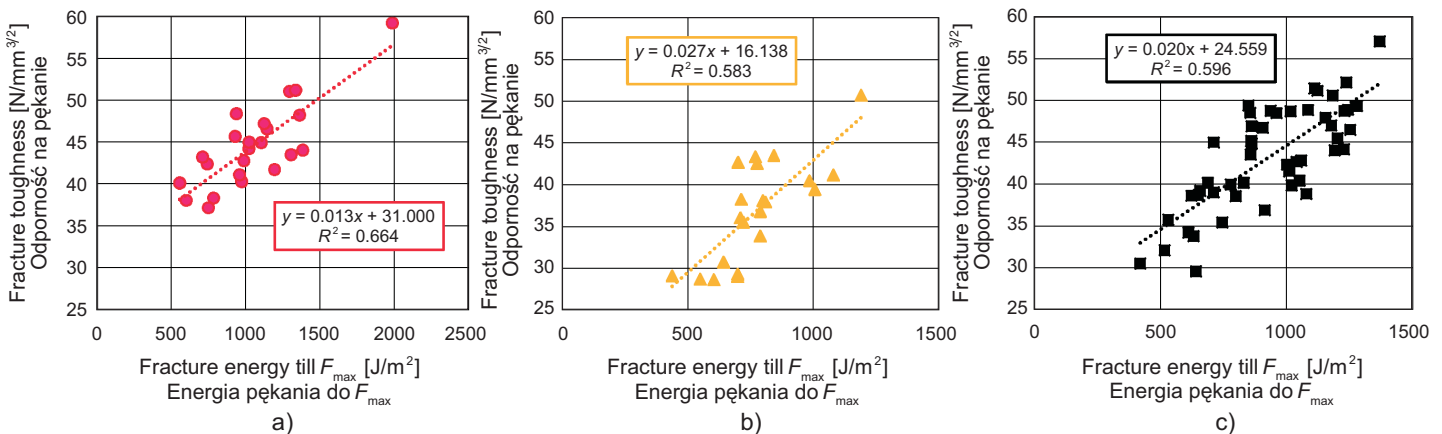


Fig. 3. Comparison of fracture toughness and fracture energy for mixtures: a) AC_{sur} 11, b) AC_{bind} 16, c) HMAC 22

Rys. 3. Porównanie odporności na pękanie i energii pękania dla mieszank: a) AC_{sur} 11, b) AC_{bind} 16, c) HMAC 22

Parametry związane z pękaniem zostały również zestawione ze sztywnością mieszanek (IT-CY) określoną w temperaturze 15°C, chociaż takie porównania mogą być dyskusyjne. Temperatura 15°C jest kluczowa w projektowaniu nawierzchni w Czechach, stąd właśnie ta temperatura została wybrana do badań sztywności (TP 170 [15]). Za porównaniem tym kryło się założenie, że sztywność mieszanki jest powiązana z jej kruchością i może również stanowić jeden z parametrów wpływających na właściwości niskotemperaturowe. Zazwyczaj im sztywniejsza jest mieszanka, tym bardziej można się spodziewać nagłego zniszczenia. Porównanie właściwości odzwierciedlających mechanikę pęknięcia z modułami sztywności dostarczyło interesujących danych.

Korelacja między odpornością na pęknięcie a modułem sztywności (Rys. 4) okazała się słabsza niż między dwoma parametrami związanymi z pękaniem. W przypadku mieszanek AC_{surf} korelacja jest zerowa – nie istnieje żadna zależność między parametrami. Dla mieszanek AC_{bind} oraz HMAC współczynnik determinacji wynosi około 0,5, co oznacza pewien poziom zależności; nie jest on jednak dostatecznie wysoki.

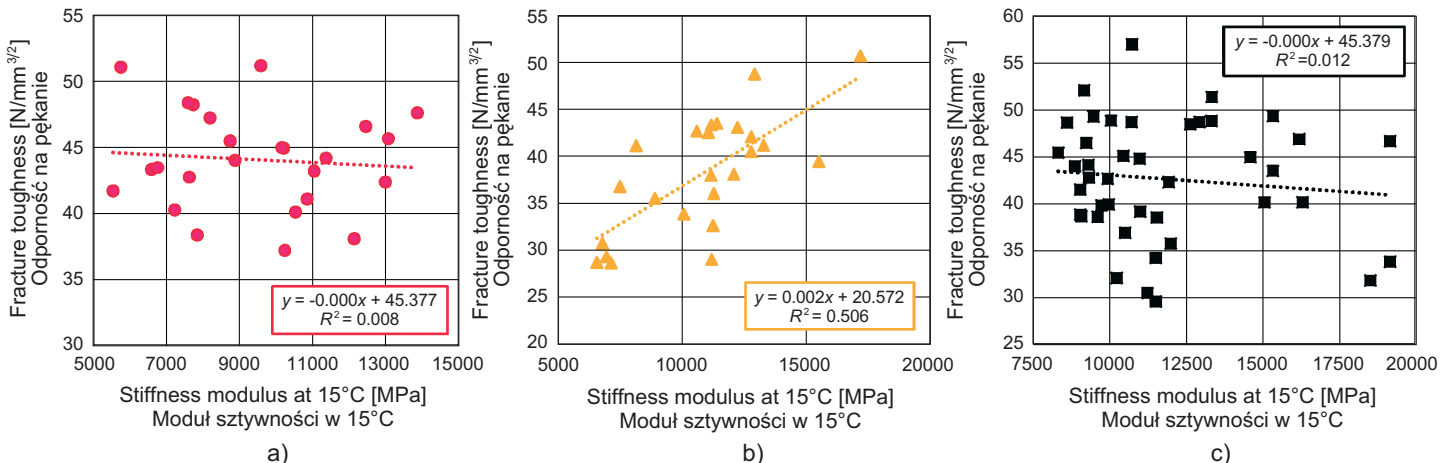


Fig. 4. Comparison of fracture toughness and stiffness modulus for mixtures: a) AC_{surf} 11, b) AC_{bind} 16, c) HMAC 22
 Rys. 4. Porównanie odporności na pęknięcie i modułu sztywności dla mieszanek: a) AC_{surf} 11, b) AC_{bind} 16, c) HMAC 22

Regresja liniowa dla mieszanek HMAC wskazuje na trend malejący – im sztywniejsza mieszanka, tym mniejszą siłę może przenieść wykonana z niej próbka. Jest to trend spodziewany, jako że zazwyczaj im sztywniejsza jest mieszanka, tym większą kruchością się charakteryzuje. Dla mieszanek AC_{bind} trend jest odwrotny – im sztywniejsza mieszanka, tym większa odporność na pęknięcie. Jest to interesujące i dość zaskakujące zjawisko, zwłaszcza biorąc pod uwagę, że niemal połowa testowanych mieszanek zawierała minimum 40% destruktu asfaltowego. Regresja liniowa sugeruje, że mieszanki są sztywne, lecz nie kruche.

Fracture parameters were also compared with stiffness (IT-CY) determined at 15°C, even though the comparison can be disputable. The temperature of 15°C is crucial in pavement design in the Czech Republic, therefore this temperature was preferable for stiffness (TP 170 [15]). The idea behind this comparison was that stiffness of a mixture is related to its brittleness, and can be one of the properties influencing low-temperature properties as well. Usually the stiffer the mixture, the more sudden the failure behaviour that can be expected. The comparison of fracture characteristics and stiffness modulus provided interesting data.

The correlation between fracture toughness and stiffness modulus (Fig. 4) showed lower values than in previous comparisons of fracture parameters. The correlation is null for AC_{surf} mixture – there is no dependence between the parameters. For AC_{bind} and HMAC mixtures, coefficient of determination is approx. 0.5, which shows a certain level of dependence, but it is not sufficiently strong.

The trend line shows a decreasing trend for HMAC mixtures – the stiffer the mixture, the lesser the force that the specimen can bear. It is an expected trend, since usually the stiffer the mixture, the more brittle it might be. For AC_{bind} mixtures the trend is opposite. The trend line is increasing – the stiffer the mixture, the higher the fracture toughness. It is interesting and quite surprising, especially considering the fact that almost half of the test variants included at least 40% of reclaimed asphalt. Such a trend line indicates mixtures that are stiff, but not brittle.

Zestawienie sztywności z energią pęknięcia (Rys. 5) sugeruje wyraźniejszą korelację niż w przypadku zestawienia sztywności z odpornością na pęknięcie. Najsilniejszą korelację stwierdzono dla betonu asfaltowego AC_{bind} 16. Można uznać, że zaobserwowana wartość $R^2 \approx 0,75$ wskazuje na silną korelację. Nawet w grupie AC_{surf} korelacja jest silniejsza niż w przypadku odporności na pęknięcie, natomiast współczynnik determinacji jest wciąż stosunkowo niski. Dla HMAC 22 wyniki porównania ze sztywnością są zbliżone dla obu parametrów mechaniki pęknięcia.

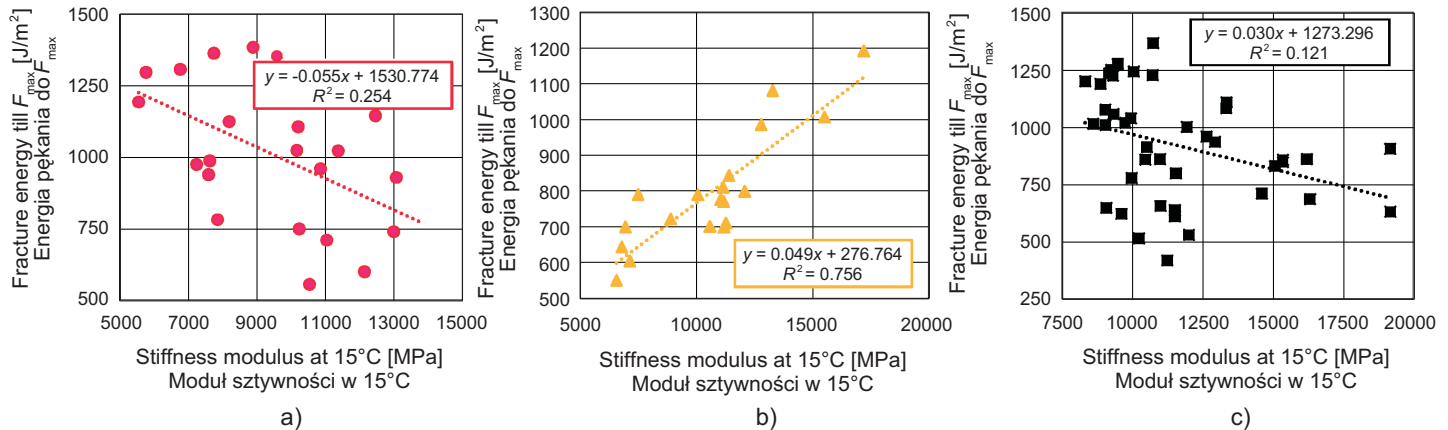


Fig. 5. Comparison of fracture energy and stiffness modulus for mixtures: a) AC_{surf} 11, b) AC_{bind} 16, c) HMAC 22
Rys. 5. Porównanie energii pęknięcia i modułu sztywności dla mieszanek: a) AC_{surf} 11, b) AC_{bind} 16, c) HMAC 22

Ogólnie rzecz biorąc, korelacja między sztywnością a energią pęknięcia jest silniejsza niż między sztywnością a odpornością na pęknięcie. A zatem energia pęknięcia wydaje się związana z modułem sztywności w bardziej przewidywalny sposób. Niemniej jednak, nie musi to oznaczać, że energia pęknięcia stanowi lepszy parametr do oceny mieszanek. Może ona zapewne być wykorzystana w projektowaniu mieszanek jako wskaźnik jakościowy zapewniający równowagę między oczekiwaną sztywnością a dostateczną odpornością na pęknięcie mieszanki asfaltowej.

4. PORÓWNANIE PARAMETRÓW MECHANIKI PĘKANIA

Wagę oceny obu parametrów mechaniki pęknięcia obrazuje Rys. 6. Przedstawia on wyniki uzyskane dla dwóch zestawów mieszanek (przeciętnie dokonano 6 pomiarów dla każdej mieszanki). Przedstawione mieszanki uzyskiwały te same (lub bardzo zbliżone) wartości jednego parametru, lecz znacząco różne wartości drugiego. Przedstawione mieszanki AC_{surf} osiągały podobne wartości odporności na pęknięcie (ok. 42 N/mm^{3/2}), lecz energia pęknięcia mieszanki #8 (# ozn. określoną mieszankę w grupie) była o 40% niższa. Z drugiej strony, mieszanki AC_{bind} wykazywały tę samą energię pęknięcia (ok. 700 N/m²), lecz odporność na pęknięcie mieszanki #5 była o 30% niższa.

When stiffness is compared with fracture energy (Fig. 5), the correlation is stronger than for comparison of stiffness with fracture toughness. The strongest correlation was noted for the asphalt concrete AC_{bind} 16. The observed $R^2 \approx 0,75$ can be determined as strong. Even for AC_{surf} the correlation is stronger than in the case of fracture toughness, but the coefficient of determination is still relatively low. For HMAC 22 the results of comparison are similar for both fracture parameters.

Generally, correlation of stiffness and fracture energy is stronger than correlation of stiffness and fracture toughness. Therefore, fracture energy seems to be related to stiffness modulus in a more predictable manner. Nevertheless, it doesn't necessarily mean that fracture energy is a better parameter for evaluation. It could be probably used in mix design as a qualitative indication providing balance between the expected stiffness and sufficient crack resistance of the asphalt mixture.

4. COMPARISON OF FRACTURE PARAMETERS

The importance of evaluation of both fracture parameters is demonstrated in Fig. 6. The figure shows results obtained for two sets of mixtures (on average, 6 measurements were performed for each mixture). The presented mixtures always reached the same (or very similar) value for one parameter, but significantly different value for the other one. The shown AC_{surf} mixtures reached similar fracture toughness value (approx. 42 N/mm^{3/2}), but fracture energy of mixture #8 (# indicates some particular mixture in the group) is 40% smaller. On the other hand, the AC_{bind} mixtures reached the same fracture energy (approx. 700 N/m²), but fracture toughness of mixture #5 is 30% smaller.

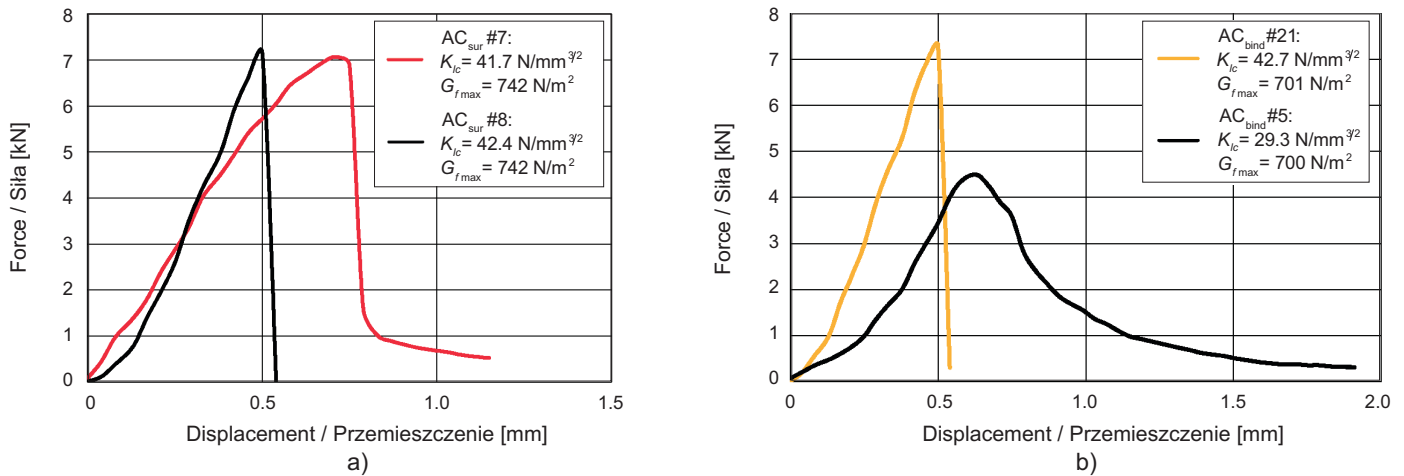


Fig. 6. Force-displacement curve of selected mix variants (# stands for a particular mix) : a) AC_{surf} #7 and AC_{surf} #8, b) AC_{bind} #21 and AC_{bind} #5
 Rys. 6. Krzywe siła-przemieszczenie wybranych wariantów mieszanek (# oznacza mieszankę) : a) AC_{surf} #7 i AC_{surf} #8, b) AC_{bind} #21 i AC_{bind} #5

Nie jest oczywiste, które z ocenianych mieszanek asfaltowych wykażą się lepszą pracą i trwałością w nawierzchni obciążonej rzeczywistym ruchem i oddziaływaniami klimatycznymi. Choć odpowiedź zależałaby od kilku warunków granicznych, z pewnością można stwierdzić, że rozpatrywane mieszanki nie wykazują identycznej odporności na pękanie.

Średnie wartości badanych parametrów wraz z odchyleniami standardowymi przedstawiono na Rys. 7. Wyniki wskazują, że najwyższą sztywność w 15°C osiągnęły mieszanki HMAC (czego należało się spodziewać). Najlepsze parametry mechaniki pękania wykazywały mieszanki AC_{surf}, których średnia wartość odporności na pękanie była o 3,5% wyższa niż średnia dla HMAC oraz 15% wyższa niż średnia dla AC_{bind}. Odchylenie standardowe wyników wzrasta wraz ze wzrostem rozmiaru ziarna kruszywa.

It is not immediately obvious which of the assessed asphalt mixtures will have better performance, efficiency and durability under real traffic load and climate conditions in a pavement structure. While the answer may depend on several boundary conditions, the asphalt mixtures certainly cannot be classified to have the same resistance to cracking.

The average values of test parameters with standard deviations are shown in Fig. 7. Unsurprisingly, the results show that the highest stiffness at 15°C was reached by HMAC. The best fracture parameters were reached by AC_{surf}, showing average fracture toughness value 3.5% higher than HMAC and 15% higher than AC_{bind}. Standard deviation of the test results increases with an increase in aggregate particle size.

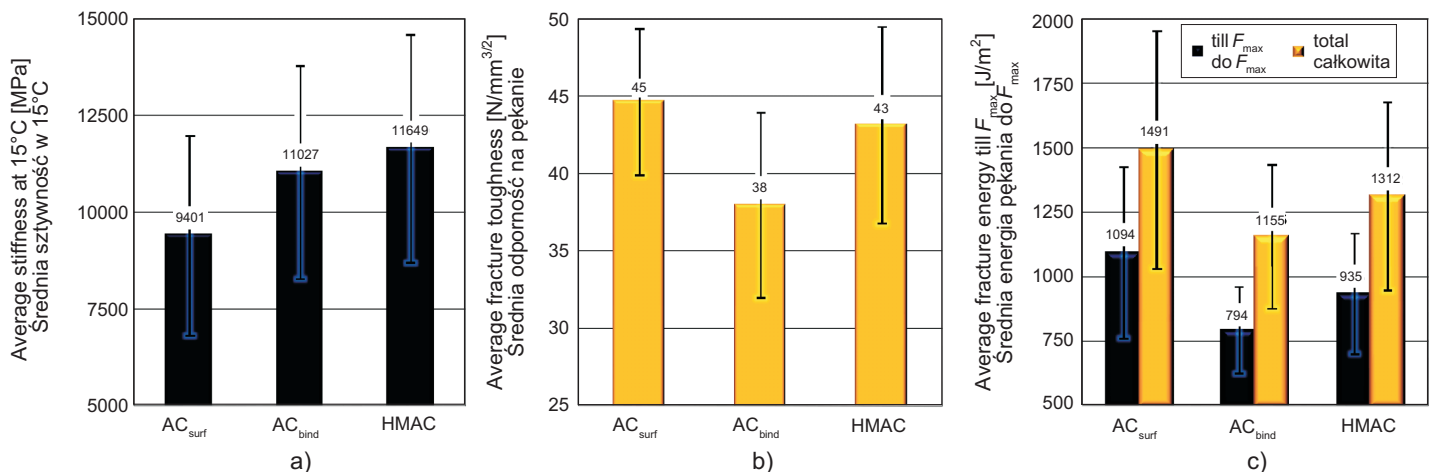


Fig. 7. Average test parameters of mineral-asphalt mixtures: a) stiffness at 15°C, b) fracture toughness, fracture energy till F_{max}
 Rys. 7. Wartości średnie parametrów mieszanek mineralno-asfaltowych: a) sztywność w 15°C, b) odporność na pękanie, c) energia pękania do wartości F_{max}

Wartości energii pęknięcia wykazują te same trendy co wartości odporności na pęknięcie, lecz różnice względne są wyraźniejsze. Energia pęknięcia (w tym zestawieniu) maleje wraz z malejącą zawartością lepiszcza asfaltowego w mieszankach. Odchylenie standardowe w tym przypadku jest najniższe dla mieszanek AC_{bind} . Odchylenie standardowe dla AC_{surf} jest niemal dwukrotnie wyższe.

Rys. 8 przedstawia „względne odniesienie” badanego parametru do wartości średniej dla danej grupy mieszanek – odzwierciedla, o ile procent dana wartość różni się od wartości średniej. W idealnym przypadku (wysokiej korelacji między odpornością na pęknięcie a energią pęknięcia) obie krzywe na każdym z wykresów powinny mieć zbliżony przebieg, jednakże wyniki wykazują odmienne tendencje. O ile niektóre wyniki są podobne, stwierdzono również wyniki różniące się istotnie – np. dana mieszanka wykazuje przeciętną odporność na pęknięcie przy bardzo wysokiej bądź bardzo niskiej energii pęknięcia.

The values of fracture energy have the same trend as for fracture toughness, but the relative difference is more pronounced. Fracture energy (in this comparison) decreases with the decrease in the amount of bituminous binder in the mixtures. Standard deviation in this case is the lowest for AC_{bind} mixtures. Standard deviation for AC_{surf} is almost twice as high.

Fig. 8 shows “comparative ratio” of test parameter to average value in a given mixture group – reflecting by how many percent the characteristic differs from the average value. In an ideal case of high correlation between fracture toughness and fracture energy, the two curves on each chart should have similar trends. Nevertheless, the results show different tendencies. While some of the results are similar, there are also results which differ significantly – e.g. a mixture shows average fracture toughness, but either very high or very low fracture energy.

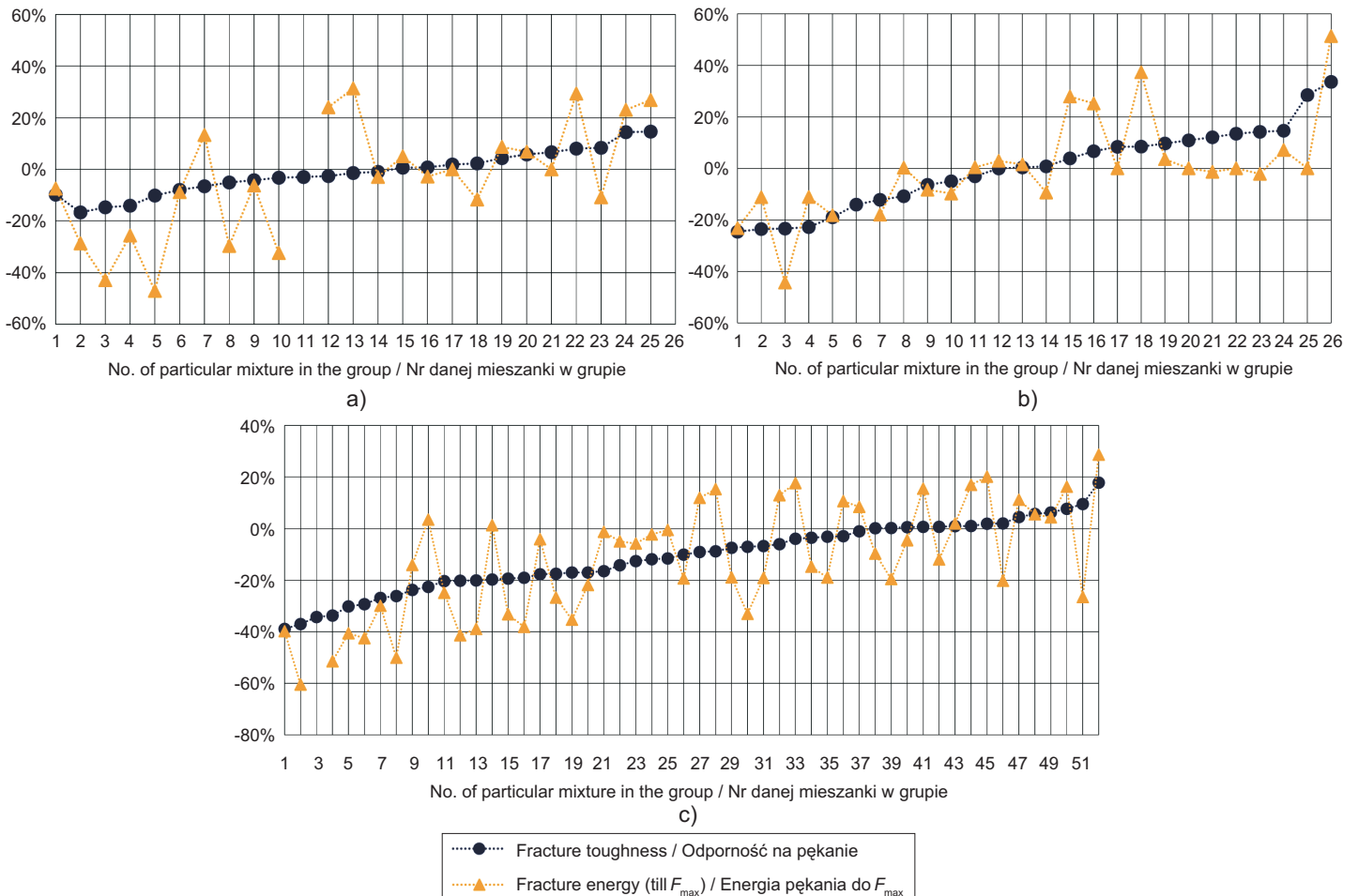


Fig. 8. Ratio of the measured test parameter to the average value in a given group of mixtures: a) AC_{surf} 11, b) AC_{bind} 16, c) HMAC 22
Rys. 8. Stosunek pomierzonego parametru do wartości średniej tego parametru w poszczególnych grupach mieszanek: AC_{surf} 11, b) AC_{bind} 16, c) HMAC 22

5. WNIOSKI

Badania przedstawione w artykule posłużyły do oceny trzech grup mieszanek asfaltowych używanych do trzech typowych warstw konstrukcji nawierzchni z uwagi na ich parametry mechaniki pęknięcia określone z zastosowaniem zmodyfikowanej metody SCB.

Nieemożliwe jest stwierdzenie, który z rozpatrywanych w badaniu parametrów jest lepszy czy bardziej odpowiedni. Ogólnie rzecz biorąc, energia pęknięcia wykazała lepszą korelację ze sztywnością określoną w 15°C. Do rozstrzygnięcia pozostaje kwestia, czy sztywność określona w zakresie umiarkowanych wartości temperatury jest najlepszym odpowiednikiem porównawczym dla parametru odzwierciedlającego mechanikę pęknięcia – przy czym normy czeskie nie określają żadnych innych właściwości związanych z deformacją (odkształceniem), które miałyby być mierzone eksperymentalnie dla betonów asfaltowych (sztywność natomiast musi być mierzona tylko dla mieszanek HMAC – w Polsce oznaczanych jako ACWMS). Moduł sztywności w temperaturze 15°C stanowi w praktyce jeden z kluczowych parametrów stosowanych w projektowaniu nawierzchni.

Z zasady najkorzystniejszym podejściem jest zastosowanie obu parametrów i ich interpretacja z różnych perspektyw. Odporność na pęknięcie jest określona przez siłę maksymalną i odpowiadające jej przemieszczenie, a zatem odzwierciedla ona maksymalną siłę, którą może przenieść mieszanka. Energia pęknięcia jest określona przez przebieg obciążenia, a więc może stanowić wyznacznik liczby powtórzeń obciążenia, którą nawierzchnia może przenieść w niskich wartościach temperatury. Jako że oba parametry odzwierciedlają odmienne właściwości warstwy asfaltowej, ich zastosowanie pozwala na lepsze zrozumienie i bardziej precyzyjne prognozowanie pracy nawierzchni.

INFORMACJE DODATKOWE

Niniejszy artykuł powstał w ramach projektu nr GA18-13830S finansowanego przez Czeską Fundację Naukową (GACR).

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Krans R.L., Tolman F., Van De Ven M.F.*: Semi-circular bending test: a practical crack growth test using asphalt concrete cores. Reflective cracking in pavements: Design and performance of overlay systems. Proceedings of the Third International RILEM Conference, Maastricht, The Netherlands, 1996, 123-132
- [2] *Lu D.X., Nguyen N.H.T., Saleh M., Bui H.H.*: Experimental and numerical investigations of non-standardised semi-circular bending test for asphalt concrete mixtures. International Journal of Pavement Engineering, 2019, DOI: 10.1080/10298436.2019.1654608

5. CONCLUSIONS

The research summarized in this paper evaluates 3 groups of asphalt mixtures for three typical structural pavement layers, focusing on fracture parameters determined using the modified SCB test method.

It is impossible to definitely say which test parameter is better or more appropriate. Generally, fracture energy displayed better correlation with stiffness determined at 15°C. The question remains whether stiffness at intermediate temperature is the best comparative counterpart to a fracture parameter, but the Czech standards do not define any other deformation (strain) characteristics to be tested for asphalt concretes (and stiffness has to be determined only for HMAC mixtures). Nevertheless, it is a characteristic which is used in practice as one of the key performance parameters for pavement design.

Universally, the best approach is to use both parameters and interpret them from different perspectives. Fracture toughness is defined by the maximum force and displacement; therefore, it reflects the maximum force which an asphalt mixture can bear. Fracture energy is defined by the course of the loading, which may indicate how many load repetitions at low temperatures the pavement can withstand. Since both parameters define different properties of an asphalt layer, their use may enable better understanding and more precise prediction of the mechanical behaviour of the pavement.

ACKNOWLEDGEMENT

This paper was elaborated within the activities of project no. GA18-13830S supported by The Czech Science Foundation (GACR).

- [3] *Vidal G.V., Calabi-Floody A., Sanchez-Alonso E.*: Evaluation of the durability of asphalt mixtures depending on the physical properties of aggregates. Revista de la Construcción / Journal of Construction, **16**, 1, 2017, 92-103, DOI: 10.7764/RDLC.16.1.9
- [4] *Omrnian S.R., Hamzah M.O., Hasan R.M.H.*: Introducing New Indicators to Evaluate Fracture Properties of Asphalt Mixtures Using Semicircular Bending Test. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, **43**, 2019, 541-549, DOI: 10.1007/s40996-018-0205-1

- [5] *Nsengiyumva G.*: Development of Semi-Circular Bending (SCB) Fracture Test for Bituminous Mixtures. Civil Engineering Theses, Dissertations, and Student Research, University of Nebraska, Lincoln, 2015, <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1090&context=civilengdiss> (20.05.2021)
- [6] *Liu Y., Li J., Zhang X.N.*: Study on Critical Fracture Criterion of Asphalt Mixture Based on the Semi-Circular Bending Test. *Applied Mechanics and Materials*, **178-181**, 2012, 1488-1494, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.178-181.1488
- [7] EN 12697-44:2010 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 44: Crack propagation by semi-circular bending test
- [8] *Vacková P., Valentin J., Belhaj M.*: Experience with modified semicircular bending test for qualitative evaluation of asphalt mixtures. International Conference "Sustainable and Resilient Roads" WEBFORUM, Polski Kongres Drogowy, 29 October 2020 (materials available from the publisher)
- [9] *Vacková P., Valentin J., Belhaj M.*: What information can be provided by the asphalt crack propagation test done on semicylindric specimens? IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **960**, 4, 2020, 042032
- [10] *Vacková P., Valentin J.*: Comparison of asphalt mix testing in low temperature range. Rozvoj cestnej infraštruktúry pri príležitosti XXIII. seminár Ivana Poliačka s medzinárodnou účasťou. Kongres STUDIO, Bratislava, 2018, 121-132
- [11] *Vacková P., Valentin J.*: Comparison of flexural strength and crack propagation test characteristics of SMA mixtures including the ageing impact. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Proceedings of the 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRRA 2017), June 28-30, 2017, Athens, Greece, CRC Press, London, 2017, 185-192
- [12] *Taylor A.J.*: Cracking Group Experiment - Evaluation of Laboratory Cracking Tests. FHWA Mixture ETG - May 2018. National Center of Asphalt Technology NCAT, Auburn University, 2018, https://www.asphaltpavement.org/uploads/documents/Engineering_ETGs/Mix_201805/12_Taylor_Performance%20Testing%20_Part1_NCATTTesting.pdf
- [13] ASTM D8044-16 Standard Test Method for Evaluation of Asphalt Mixture Cracking Resistance using the Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures
- [14] AASHTO TP 105. Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semicircular Bend Geometry (SCB)
- [15] Technical conditions TP 151. High modulus asphalt mixtures (HMAC). Ministry of Transport of Czech Republic, Department of Road Infrastructure, 2010