

PRZEMYSŁAW OSTROWSKI¹⁾ADAM ZOFKA²⁾KRZYSZTOF BŁĄŻEJOWSKI³⁾

VECD METHOD AS A TOOL FOR EVALUATION OF PAVEMENT STRUCTURE FATIGUE PERFORMANCE

METODA VECD JAKO NARZĘDZIE DO OCENY TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI

STRESZCZENIE. Postęp technologiczny i wprowadzenie do stosowania zaawansowanych materiałów o ponadstandardowych właściwościach, np. mieszanek mineralno-asfaltowych z lepiszczami wysokomodyfikowanymi polimerami HiMA (ang. *highly modified asphalt*), wymaga poszukiwania metody umożliwiającej kompleksowe uwzględnienie cech tych materiałów w obliczeniach. Jedną z takich metod może być metoda wykorzystująca model rozproszonego niszczenia w ośrodku lepko-sprężystym (ang. *viscoelastic continuum damage model*, VECD). W artykule zaprezentowano metodologię opartą na modelu VECD oraz możliwości, jakie daje przy wymiarowaniu nawierzchni drogowych. Opisano poszczególne komponenty metody: analogię sprężysto-lepko-sprężystą, mechanikę rozproszonego niszczenia i zasadę równoważności temperaturowo-czasowej z przyrostowym niszczeniem. Przedstawiono również koncepcję uproszczonych obliczeń w metodzie S-VECD (ang. *simplified viscoelastic continuum damage model*). Artykuł zawiera opisy opracowanych kryteriów zniszczenia. Przybliżono również metody badań, które dostarczają danych wejściowych. W końcowej części artykułu przedstawiono przykładową analizę porównawczą z wykorzystaniem metody S-VECD dla konstrukcji z mieszankami mineralno-asfaltowymi z HiMA w warstwie podbudowy i mieszankami mineralno-asfaltowymi z HiMA we wszystkich warstwach.

ABSTRACT. The technical progress and introduction of advanced materials with superior properties, e.g. asphalt mixtures containing highly modified asphalt binders (HiMA), necessitates investigations of methods that would enable comprehensive consideration of characteristics of the new materials in calculations. Such methods may include the methodology based on viscoelastic continuum damage model (VECD). The article presents the VECD model and its potential for use in pavement structure design. Individual components of the method are described: the elastic-viscoelastic correspondence principle, continuum damage mechanics and the time-temperature superposition principle with growing damage. The concept of calculations using the simplified viscoelastic continuum damage model (S-VECD) is presented as well. The article also includes descriptions of the established failure criteria and the test methods that provide input data. Closing sections of the article present an example of comparative analysis using the S-VECD method for structures with HiMA mixtures in base layer only and and HiMA mixtures in all layers (full-HiMA structures).

SŁOWA KLUCZOWE: HiMA, trwałość zmęczeniowa, VECD.

KEYWORDS: fatigue performance, HiMA, VECD.

DOI: 10.7409/rabdim.021.012

¹⁾ ORLEN Asfalt sp. z o.o. ul. Łukasiewicza 39, 09-400 Płock, przemyslaw.ostrowski@orlen.pl (✉)

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa, azofka@ibdim.edu.pl

³⁾ ORLEN Asfalt sp. z o.o. ul. Łukasiewicza 39, 09-400 Płock, krzysztof.blazejowski@orlen.pl

1. WPROWADZENIE

Postępujący rozwój sieci drogowej w Polsce przekłada się na coraz większe natężenie ruchu pojazdów, w tym pojazdów ciężarowych, których oddziaływanie ma największy wpływ na trwałość nawierzchni drogowych. Inżynierowie drogownictwa nieustannie zmagają się z problemem spękań zmęczeniowych występujących w nawierzchniach drogowych. Powszechnie uważa się, że spękania zmęczeniowe powstają na skutek cyklicznego rozciągania na spodzie warstw asfaltowych i propagują ku górze konstrukcji (tzw. *bottom-up cracking*), ale spękania zmęczeniowe mogą również pojawić się na powierzchni konstrukcji asfaltowej w wyniku rozciągania na styku nawierzchnia–opona, propagując w dół konstrukcji (tzw. *top-down cracking*) [1]. Inżynierowie starają się rozwiązać problem spękań zmęczeniowych, a tym samym trwałości zmęczeniowej całej konstrukcji nawierzchni, stosując różne materiały i rozwiązania konstrukcyjne.

Jednym z najnowszych osiągnięć w dziedzinie wydłużenia trwałości zmęczeniowej nawierzchni asfaltowych są lepsze wysokomodyfikowane polimerami, tzw. HiMA (z ang. *highly modified asphalt*). Pierwsze próby z tym materiałem miały miejsce w USA w 2009 r. na odcinku testowym, a także na torze doświadczalnym NCAT Pavement Test Track [2, 3]. Swoje doświadczenia ze stosowania lepszycy wysokomodyfikowanych opisali również autorzy [4-8]. W Polsce po raz pierwszy mieszankę mineralno-asfaltową z lepszycem HiMA wbudowano w 2013 r. Odtąd z powodzeniem wykonano wiele odcinków z tym lepszycem, a zebrane dane pozwalają stwierdzić, że mieszanki mineralno-asfaltowe wykonane z użyciem lepszycy HiMA charakteryzują się ponadstandardowymi właściwościami w stosunku do tradycyjnie stosowanych asfaltów [9-12].

Problemem, z którym obecnie należy się zmierzyć, jest znalezienie efektywnego sposobu prognozowania parametrów funkcjonalnych i obliczania trwałości nawierzchni z nowoczesnymi materiałami takimi jak HiMA.

Na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w roku 2014 został wprowadzony do stosowania Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych opracowany na Politechnice Gdańskiej pod kierownictwem prof. Judyckiego [13]. Zostały w nim uwzględnione modele obliczeniowe konstrukcji nawierzchni oparte na różnych metodach, m.in. metodzie Instytutu Asfaltowego, metodzie francuskiej czy

1. INTRODUCTION

The ongoing development of road network in Poland leads to an increase in traffic – including the heavy traffic, which affects pavement service life to the greatest degree. Highway engineers continuously are looking for mitigation the problem of fatigue cracks in road pavements. While it is widely recognized that fatigue cracks propagate upwards after they are initiated due to cyclic tension at the bottom of the asphalt layers (“bottom-up cracking”), they may also appear on top of the pavement due to tension at the tire-surface contact area and propagate downwards (“top-down cracking”) [1]. The engineers alleviate the problem of fatigue cracking – and, therefore, of the overall road pavement fatigue life – by using various material and structural solutions.

The latest achievements in the field of pavement fatigue life extension include the use of highly modified asphalt binders (HiMA). First trials with the novel material were conducted in the USA in 2009 at a test section and at the NCAT Pavement Test Track [2, 3]. The authors of [4-8] have also described their experience with the use of highly modified binders. In Poland the first asphalt mixture containing HiMA binder was paved in 2013. Many road sections using such binders were successfully constructed afterwards, and the gathered data indicate that HiMA-based asphalt mixtures are characterized by superior non-standard properties in comparison with mixtures containing typically used binders [9-12].

Currently, the most urgent problem that calls for solution is the identification of an effective method for prediction of performance parameters and calculation of lifespan of pavements containing innovative materials such as HiMA.

The Catalog of Typical Flexible and Semi-Rigid Pavements commissioned by the General Directorate for National Roads and Motorways and developed at the Gdańsk University of Technology under the direction of Prof. Judycki was introduced in 2014 [13]. It takes into account pavement structure calculation models based on various methods, including the Asphalt Institute method, the French method and the most recent findings of tests and field investigations conducted in the USA within the AASHTO 2004 program [14]. The algorithms used in these methods include such parameters as the stiffness moduli and Poisson ratios of particular layers, volumetric parameters of asphalt mixtures and adequate coefficients

najbardziej aktualnych wynikach badań i obserwacji terenowych prowadzonych w USA w ramach programu AASHTO 2004 [14]. Metody te w swoich algorytmach uwzględniają takie parametry jak moduły sztywności warstw, współczynniki Poissona, parametry objętościowe mieszanek mineralno-asfaltowych i odpowiednie współczynniki przeliczeniowe ze względu na obciążenie ruchem oraz grubość warstw asfaltowych [15, 16]. Jak jednak zaznaczyli autorzy, w [13] dla mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem drogowym i modyfikowanym przyjęto jednakowe wartości modułów sztywności i charakterystyki zmęczeniowe, co jest znacznym uproszczeniem. Jak wykazano w wielu badaniach [12], w projekcie RID [17] czy publikacjach ORLEN Asfalt [18-20], mieszanki mineralno-asfaltowe (mma) zawierające w swoim składzie lepiszcza modyfikowane i wysokomodyfikowane polimerami wykazują znacznie wyższą trwałość zmęczeniową w porównaniu z mma z asfaltami drogowymi. Jednak w wyżej wymienionych metodach parametry trwałości zmęczeniowej poszczególnych warstw nie są uwzględniane, co nie pozwala w wiarygodny sposób przewidywać rzeczywistego zachowania mma z innowacyjnymi lepiszczami.

W wyniku poszukiwań bardziej efektywnej metody obliczania trwałości zmęczeniowej postanowiono przeanalizować możliwości, jakie daje zastosowanie modelu rozproszonego niszczenia w ośrodku lepkosprężystym (ang. *viscoelastic continuum damage model*, VECD). Jest to metoda opracowana na podstawie prac Schapery'ego [21-23], który zastosował termodynamikę procesów nieodwracalnych do opisu powstawania uszkodzeń w materiałach o właściwościach lepkosprężystych.

W niniejszym artykule podjęto po raz pierwszy w polskiej literaturze naukowej próbę opisanie metodologii opartej na modelach VECD i S-VECD oraz możliwości, jakie daje przy wymiarowaniu nawierzchni drogowych, w których wykorzystuje się innowacyjne materiały takie jak lepiszcza wysokomodyfikowane polimerami HiMA.

2. TRADYCYJNE METODY PROJEKTOWANIA

Tradycyjne mieszanki mineralno-asfaltowe i lepiszcza bitumiczne wykazują dobrze zdefiniowany związek między amplitudą przyłożonego obciążenia a trwałością zmęczeniową N_f . Korelację tę można opisać następująco [24]:

reflecting the traffic loading and thickness of the asphalt courses [15, 16]. However, as stated by the authors of [13], the same stiffness moduli and fatigue characteristics were assumed for asphalt mixtures with paving grade and polymer-modified binders, which is a considerable simplification. As demonstrated in many studies [12], the Road Innovation Development (RID) project [17] or the publications of ORLEN Asfalt [18-20], asphalt mixtures that contain modified and highly modified binders have significantly greater fatigue life than asphalt mixtures with paving grade binders. Nevertheless, since the fatigue performance parameters of individual layers are not taken into consideration in the aforementioned methods, reliable prediction of real behavior of mixtures with innovative binders is not possible.

The search for a more effective method of fatigue life determination led to investigation of the possibilities granted by the viscoelastic continuum damage model (VECD). The method was developed based on the works of Schapery [21-23], who applied the thermodynamics of irreversible processes to description of damage evolution in viscoelastic materials.

This article presents the first attempt in the Polish scientific literature to describe the methodology based on the VECD and S-VECD models and its potential for usage in design of road pavements containing innovative materials such as highly polymer-modified binders.

2. TRADITIONAL DESIGN METHODS

Typical asphalt mixtures and bituminous binders exhibit a well-defined relationship between the amplitude of the applied load and the fatigue life N_f . This correlation may be described as follows [24]:

$$N_f = A \cdot \gamma^B, \quad (1)$$

where A and B are material parameters and γ is the strain amplitude.

The most popular methods of structure fatigue life calculation in Poland are: the Asphalt Institute method [25], the French method [16, 26] and the AASHTO 2004/2008 method [14]. The literature on the subject, however, contains a number of other methods or modifications introduced in order to better adapt the method to loading or climate conditions in a given region (e.g. the Czech modification of the French method [27], the Austrian method [28]).

$$N_f = A \cdot \gamma^B, \quad (1)$$

gdzie A i B są parametrami zależnymi od materiału, a γ jest amplitudą odkształcenia.

W Polsce najczęściej stosowane są trzy metody obliczania trwałości zmęczeniowej konstrukcji: metoda Instytutu Asfaltowego [25], metoda francuska [16, 26] lub metoda AASHTO 2004/2008 [14]. W literaturze można natomiast znaleźć szereg innych metod lub modyfikacji wprowadzonych w celu lepszego dostosowania danej metody do warunków obciążenia lub klimatu panującego w danym regionie (np. czeską modyfikację metody francuskiej [27] czy metodę austriacką [28]).

Wyżej wymienione metody sprawdzają się w przypadku wykorzystania materiałów, dla których dostępna jest duża baza wyników obserwacji terenowych (takich jak lepiszcza drogowe, modyfikowane) [29]. Jednak należy zauważyć, że nie były one kalibrowane dla nowych materiałów o niestandardowych właściwościach.

W przypadku takich materiałów w celu prawidłowego modelowania ich właściwości pożądane jest zastosowanie niestandardowych metod. Przykładem może być praca opisana przez [30], w której modelowano odporność na odkształcenia lepkoplastyczne mma do warstwy wiążącej modyfikowanej różnymi woskami, z wykorzystaniem analogii sprężysto-lepkosprężystej opracowanej przez Schapery'ego [22]. Inną pracą w której wykorzystano niestandardowe metody jest [31], gdzie sztywność asfaltu lanego była modelowana z wykorzystaniem założeń mikromechaniki elementów dyskretnych.

Kolejnym materiałem, który jest trudny do modelowania z wykorzystaniem standardowych metod, są mieszanki mineralno-asfaltowe z lepiszczami typu HiMA. Charakteryzują się one odmienną relacją modułu sztywności do trwałości zmęczeniowej niż mma z lepiszczami drogowymi czy modyfikowanymi polimerami. Charakteryzują się one odmiennym mechanizmem niszczenia ze względu na niezwykle rozbudowaną sieć polimerową w stosunku do matrycy lepiszcza. Należałoby więc istniejące wzory skalibrować dla mma z HiMA na podstawie danych z wielu odcinków drogowych w długim okresie użytkowania (czasochłonność, kosztocłonność), lub zastosować inne metody, wykorzystujące funkcje jądra, które na podstawie dostępnych badań laboratoryjnych pozwalają określić trwałość zmęczeniową mma.

While these methods are valid for materials with extensive databases of available field observation results (paving grade and modified binders) [29], it should be noted that they have not been calibrated for the new materials with non-standard properties.

In the case of such materials, the use of non-standard methods is advisable in order to model their properties correctly. An example may be the research described in [30], in which the resistance to viscoplastic deformation of asphalt mixtures for binder course modified with different waxes was modeled using the elastic-viscoelastic correspondence principle developed by Schapery [22]. Another research in which non-standard methods were used is [31], where the stiffness of asphalt mastic was modeled according to the principles of the micromechanics of discrete elements.

Asphalt mixtures containing HiMA binders are another type of material which modeling with standard methods proves difficult. They are characterized by a different relationship between stiffness modulus and fatigue performance than mixtures with typical paving grade or polymer-modified binders. Due to the fact that their polymer network is considerably extended in comparison to the bitumen matrix, they are characterized by a different failure mechanism. Therefore, the existing formulas should be calibrated for HiMA-based mixtures using data obtained from multiple road sections over long service periods (which is cost- and time-consuming). Alternatively, different methods based on kernel functions may be used to determine the fatigue life of the mix based on the available laboratory test results.

3. VISCOELASTIC CONTINUUM DAMAGE MODEL – VECD

3.1. GENERAL INFORMATION

The VECD model makes it possible to describe the loss of initial properties of the pavement in the process of its exploitation, and therefore enables a multi-aspect determination of the service life of the structure.

According to the method, elastic material with a certain stiffness modulus and a certain accumulated damage may be reflected by undamaged material with reduced stiffness. The changes that develop in the material due to the progress of damage are described by the internal state

3. MODEL ROZPROSZONEGO NISZCZENIA W OŚRODKU LEPKOSPĘŻYSTYM – VECD

3.1. INFORMACJE OGÓLNE

VECD to metoda pozwalająca na opis zjawiska utraty właściwości początkowych w procesie eksploatacji konstrukcji nawierzchni, a tym samym umożliwiająca wieloaspektowe określenie wyczerpania trwałości użytkowej konstrukcji.

Według tej metody materiał sprężysty z pewnym nagromadzonym niszczeniem opisany modułem sztywności może być zastąpiony przez niezniszczony materiał ze zredukowaną sztywnością. Zmiany zachodzące w takim materiale na skutek postępującego zjawiska niszczenia są opisane przez zmienną stanu wewnętrznego S (ang. *internal state variable*). Taka teoria została rozszerzona na materiały lepkospężyste przez Schapery'ego w 1990 roku [23]. W tej adaptacji zmienne fizyczne (sztywność, naprężenie i odkształcenie) rozważa się jako pseudozmienne, czyli pseudosztywność C (miara wewnętrznej integralności materiału) oraz pseudoodkształcenie ϵ^R .

Model VECD opiera się na trzech zasadach:

- mechanice rozproszonego niszczenia,
- analogii sprężysto-lepkospężystej,
- zasadzie równoważności temperaturowo-czasowej z przyrostowym niszczeniem – pozwalającej na uwzględnienie efektów czasu obciążenia i temperatury.

Zależności między poszczególnymi elementami modelu VECD pokazano na Rys. 1.

Poniżej opisano poszczególne elementy schematu z Rys. 1 w narastającej kolejności rozbudowywania teorii VECD.

3.2. MECHANIKA ROZPROSZONEGO NISZCZENIA

Komponentami mechaniki rozproszonego niszczenia, zgodnie z opisem Park et al. [32], są:

- Zmienna stanu wewnętrznego S – jest to wielkość określająca postępujące niszczenie w materiale ciągłym.

Aby modelować zachowanie betonu asfaltowego poddanego rozciąganiu, Kim i Little [33] do obliczenia parametru uszkodzenia S zastosowali opracowany przez Schapery'ego [34] wzór oparty na użyciu całki Lebesgue'a po wartościach pseudoodkształcenia:

variable S . This theory was generalized to viscoelastic materials by Schapery in 1990 [23]. In such an adaptation, the physical variables (stiffness, stress and strain) are considered as pseudo variables, that is pseudo stiffness C (the measure of material integrity) and pseudo strain ϵ^R .

The VECD model is based on three principles:

- continuum damage mechanics,
- elastic-viscoelastic correspondence principle,
- time-temperature superposition principle (t-TSP) with growing damage, enabling consideration of the effects of loading time and temperature.

The relationships between particular elements of the VECD model are shown in Fig 1.

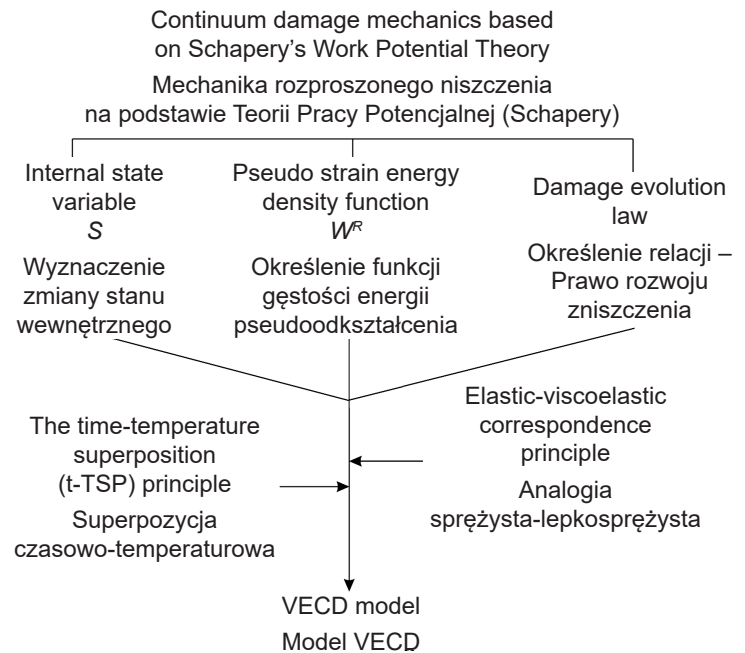


Fig. 1. Block diagram – successive elements used in the development of the VECD model

Rys. 1. Schemat blokowy – kolejne elementy wykorzystywane przy tworzeniu modelu VECD

Individual elements of the scheme shown in Fig. 1 are described below in the order of the development of the VECD theory.

3.2. CONTINUUM DAMAGE MECHANICS

The components of the continuum damage mechanics, as described by Park et al. [32], include:

$$S = \left(\int_0^t |\varepsilon^R|^p dt \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (2)$$

gdzie:

S – zmienna stanu wewnętrznego,

ε^R – pseudoodkształcenie,

t – czas,

p – parametr reprezentujący szybkość przyrostu uszkodzeń,

$$p = 2(1 + 1/m),$$

gdzie:

m – maksymalne nachylenie modułu relaksacji wykreślonego w funkcji czasu w skali log-log.

• Równanie energetyczne, funkcja gęstości energii pseudoodkształcenia – pozwala zmierzyć ilość rozproszonej i zmagazynowanej energii odkształcenia po wywołaniu uszkodzenia.

Teoria Potencjału Pracy [23, 35] obejmuje poniższe dwa kluczowe równania dotyczące naprężenia σ , pseudoodkształcenia ε^R i energii W^R . Dla betonu asfaltowego Kim et al. [36] wprowadzili następujące równania:

$$\sigma = \frac{\partial W^R}{\partial \varepsilon^R} = I \cdot C(S) \cdot \varepsilon^R, \quad (3)$$

$$W^R = \frac{I}{2} C(S) \cdot \varepsilon^{R^2}, \quad (4)$$

gdzie σ jest naprężeniem, $C(S)$ jest pseudosztywnością w funkcji zmiennej stanu wewnętrznego S . Natomiast I jest to początkowa pseudosztywność, wprowadzona przez Lee [37] w celu uwzględnienia zmienności między próbkami. W przypadku badań cyklicznych o stałej częstotliwości I można obliczyć w następujący sposób:

$$I = \frac{|E^*|_{N=1}}{|E^*|_{LVE}}, \quad (5)$$

gdzie $|E^*|_{N=1}$ jest modułem dynamicznym obliczonym w pierwszym cyklu badania cyklicznego zmęczenia, a $|E^*|_{LVE}$ jest dynamicznym modułem liniowo lepkosprężystym, który jest uzyskiwany z krzywej wiodącej modułu dynamicznego.

• Prawo rozwoju zniszczenia – prawo, które pozwala obliczyć tempo wzrostu uszkodzeń w wyniku wielokrotnego przykładania obciążenia.

• Internal state variable S – it is a value reflecting the progressive damage in the continuous material.

In order to model the behavior of asphalt concrete under tension, Kim and Little [33] calculated the S parameter applying the formula developed by Schapery [34] using the Lebesgue norm of the pseudo strain:

$$S = \left(\int_0^t |\varepsilon^R|^p dt \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (2)$$

where:

S – internal state variable,

ε^R – pseudo strain,

t – time,

p – parameter representing the speed of damage growth,

$$p = 2(1 + 1/m),$$

where:

m – the maximum slope of the relaxation modulus plotted as a function of time on a log-log scale.

• Energy equation, pseudo strain energy density function – enables determination of the values of dissipated and stored strain energy after the damage is caused to the body.

The theory of work potential [23, 35] encompasses the following two key equations related to the stress σ , pseudo strain ε^R and energy W^R . Kim et al. [36] derived the following equations for asphalt concrete:

$$\sigma = \frac{\partial W^R}{\partial \varepsilon^R} = I \cdot C(S) \cdot \varepsilon^R, \quad (3)$$

$$W^R = \frac{I}{2} C(S) \cdot \varepsilon^{R^2}, \quad (4)$$

where σ is the stress, $C(S)$ is the pseudo stiffness as function of the internal state variable S , while I is the initial pseudo stiffness, introduced by Lee [37] in order to incorporate specimen-to-specimen variability. In the case of cyclic loading tests at constant frequency, I may be calculated as follows:

$$I = \frac{|E^*|_{N=1}}{|E^*|_{LVE}}, \quad (5)$$

where $|E^*|_{N=1}$ is the dynamic modulus determined in the first cycle of the cyclic fatigue test, and $|E^*|_{LVE}$ is the linear viscoelastic dynamic modulus, determined from the master curve of the dynamic modulus.

Opracowany przez Kima i Little'a [33] model VECD opisany wzorem (2) był ograniczony do badań betonu asfaltowego przy jednostajnym rozciąganiu i nie uwzględniał wpływu temperatury, samonaprawy oraz starzenia. Dlatego w 1996 r. Park et al. [32] oraz Lee [37] opracowali bardziej zaawansowany model. Na podstawie Teorii Potencjału Pracy opracowanej przez Schapery'ego [23, 35, 38-39] zaproponowali poniższe równanie do wyliczenia stanu wewnętrznego S w betonie asfaltowym:

$$\frac{dS}{dt} = \left(-\frac{\partial W^R}{\partial S} \right)^\alpha, \quad (6)$$

gdzie:

W^R – wykonana praca (funkcja gęstości energii pseudo-odkształcenia),

S – zmienna stanu wewnętrznego,

t – czas,

α – parametr określający szybkość przyrostu uszkodzeń w materiale.

Jest to tak zwane prawo rozwoju zniszczenia (ang. *damage evolution law*).

Podstawiając równanie (4) do wzoru (6) i stosując regułę łańcucha $\left(\frac{dC}{dS} = \frac{dC}{dt} \frac{dt}{dS} \right)$ zaproponowaną przez Lee [37], otrzymujemy wzory do obliczenia S :

$$\frac{dS}{dt} = \left(-I \frac{\varepsilon^{R^2}}{2} \frac{dC}{dt} \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}}, \quad (7)$$

$$S = \int_0^t \left(-I \frac{\varepsilon^{R^2}}{2} \frac{dC}{dt} \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} dt. \quad (8)$$

3.3. ANALOGIA SPRĘŻYSTO-LEPKOSPĘŻYSTA

Schapery [22] wprowadził koncepcję zwaną „analogią sprężysto-lepkospężystą (E-VC)”, która może być stosowana zarówno do liniowych (LVE), jak i nieliniowych materiałów lepkospężystych (NLVE). Zgodnie z zasadą E-VC równania konstytutywne dla materiału lepkospężystego są równoważne równaniom materiału sprężystego, gdy zamiast rzeczywistego odkształcenia stosuje się pojęcie pseudoodkształcenia (*pseudo strain*).

• Damage evolution law – a law that enables calculation of the rate of damage growth due to multiple loads.

The VECD model developed by Kim and Little [33], described by equation (2), was limited to asphalt concrete monotonic tensile tests and did not incorporate the effects of temperature, healing or aging. Therefore, in 1996 Park et al. [32] and Lee [37] developed a more advanced model. Based on Schapery's work potential theory [23, 35, 38-39] they proposed the following equations for determination of the internal state S in asphalt concrete:

$$\frac{dS}{dt} = \left(-\frac{\partial W^R}{\partial S} \right)^\alpha, \quad (6)$$

where:

W^R – the work input (pseudo strain energy density function),

S – internal state variable,

t – time,

α – parameter representing the speed of damage growth in the material.

This formula constitutes the so-called damage evolution law.

Substituting equation (4) for W^R in equation (6) and applying the chain rule $\left(\frac{dC}{dS} = \frac{dC}{dt} \frac{dt}{dS} \right)$ proposed by Lee [37], we obtain the formulas for calculation of S :

$$\frac{dS}{dt} = \left(-I \frac{\varepsilon^{R^2}}{2} \frac{dC}{dt} \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}}, \quad (7)$$

$$S = \int_0^t \left(-I \frac{\varepsilon^{R^2}}{2} \frac{dC}{dt} \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} dt. \quad (8)$$

3.3. ELASTIC-VISCOELASTIC CORRESPONDENCE PRINCIPLE

Schapery [22] introduced the concept known as the “elastic-viscoelastic correspondence principle (E-VC)”, which may be applied both to linear (LVE) and nonlinear viscoelastic materials (NLVE). According to the E-VC principle, constitutive equations for viscoelastic material may be represented by equations for elastic material if pseudo strain is introduced instead of real strain.

Dla materiałów lepkosprężystych wielkość naprężenia jest związana z przyrostem odkształcenia w czasie $\frac{d\varepsilon}{dt}$ (Rys. 2) i jest zdefiniowana za pomocą całki splotowej:

$$\sigma = \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau. \quad (9)$$

Natomiast powiązanie naprężenia σ i pseudoodkształcenia ε^R można opisać wzorami następująco:

$$\frac{\sigma}{E_R} = \frac{1}{E_R} \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau, \quad (10)$$

z prawa Hooke'a $\sigma = E_R \varepsilon^R$,

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau, \quad (11)$$

gdzie:

E_R – oznacza moduł referencyjny dla niezniszczonego materiału (1 kPa),

t – czas,

τ – czas - zmienna relaksacji materiału.

Wraz z postępującym gromadzeniem zniszczenia w materiale poddanemu cyklicznemu obciążeniu następuje pochycenie pętli histerezy naprężenie–pseudoodkształcenie lub jej przesunięcie – w zależności od trybu, w jakim prowadzone jest obciążenie (Rys. 3) [41] – co może być zobrazowane poprzez malejącą wartość pseudoszywności C w funkcji zmiany stanu wewnętrznego S . W takim podejściu równanie konstytutywne można zapisać:

$$\sigma = C(S) \cdot \varepsilon^R. \quad (12)$$

Dla materiału niezniszczonego wartości naprężenia i pseudoodkształcenia są liczbowo identyczne, czyli C jest równe 1. Zależność $C(S)$ jest charakterystyczną funkcją każdego materiału i jest nazywana krzywą przebiegu niszczenia (ang. *damage characteristic curve*) przy założeniu, że materiał znajduje się w liniowym zakresie i nie zachodzą w nim żadne zmiany chemiczne. Ta krzywa wiąże ze sobą postęp w niszczeniu S (zmienna stanu wewnętrznego, przyczyna) z integralnością materiału C (pseudoszywność, efekt). Przykładowa zależność została pokazana na Rys. 4.

For viscoelastic materials, the value of stress is related to the change of strain in time $\frac{d\varepsilon}{dt}$ (Fig. 2) and is defined using a convolution integral:

$$\sigma = \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau. \quad (9)$$

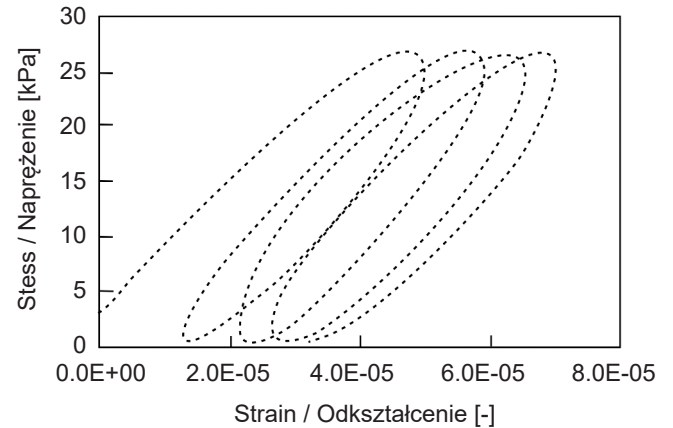


Fig. 2. An example stress–strain chart for linear viscoelastic materials – it should be noted that due to the viscoelastic nature of the material (phase shift) and time dependence it may seem that permanent deformation also occurs in the material [40] Rys. 2. Przykładowy wykres naprężenie–odkształcenie dla materiałów liniowo lepkosprężystych (należy zwrócić uwagę, że ze względu na lepkosprężystą naturę materiału (przesunięcie fazowe) i zależność od czasu może się wydawać, że w materiale powstaje odkształcenie trwałe) [40]

The relation between stress σ and pseudo strain ε^R may be described by the following equations:

$$\frac{\sigma}{E_R} = \frac{1}{E_R} \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau, \quad (10)$$

according to Hooke's law $\sigma = E_R \varepsilon^R$,

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau, \quad (11)$$

where:

E_R – reference modulus for undamaged material (1 kPa),

t – time,

τ – time - material relaxation variable.

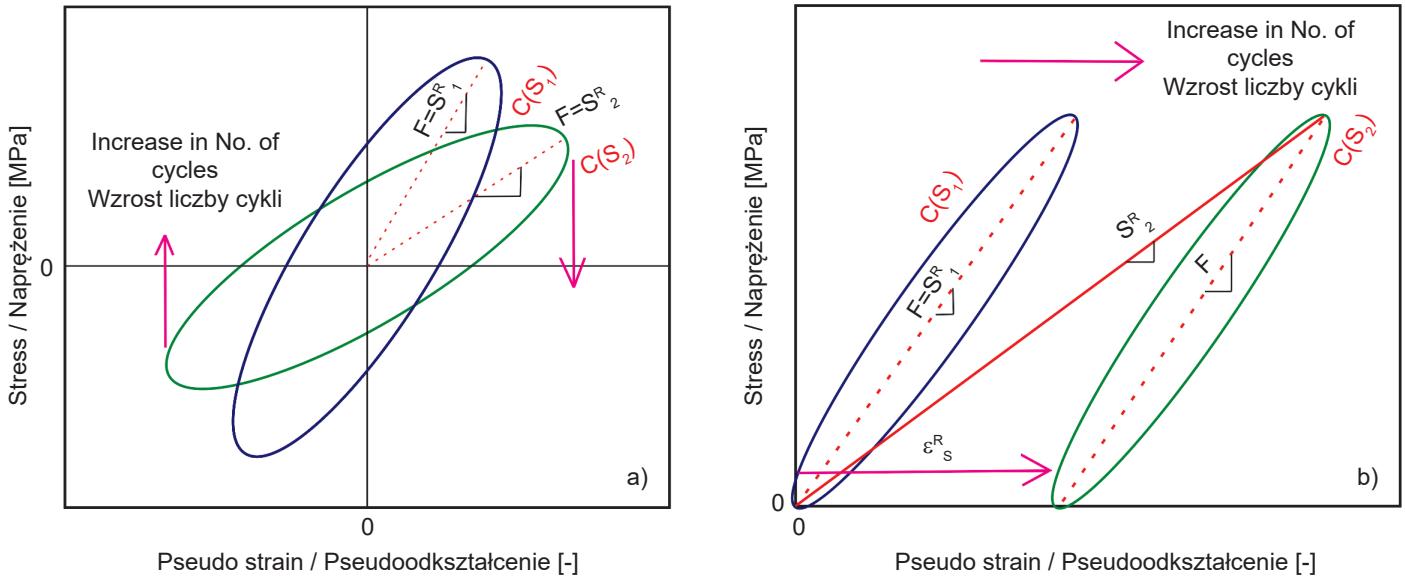


Fig. 3. A change in stiffness visible in the stress–pseudo strain chart in the case of tests in two modes: a) controlled strain, b) controlled stress [40]

Rys. 3. Zmiana sztywności na podstawie wykresu naprężenie–pseudoodkształcenie w przypadku badań w dwóch trybach: a) przy kontrolowanym odkształceniu, b) przy kontrolowanym naprężeniu [40]

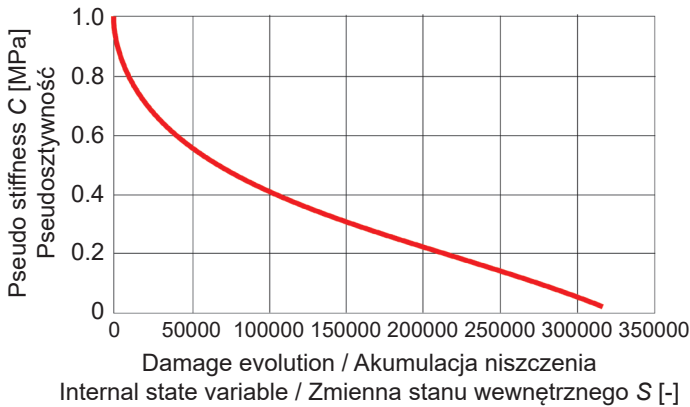


Fig. 4. An example of damage characteristic curve $C(S)$ [20]
Rys. 4. Przykładowa krzywa przebiegu niszczenia $C(S)$ [20]

Wartość pseudoszywności C można wyznaczyć w badaniu cyklicznym (ściskanie, rozciąganie, ściskanie–rozciąganie). Należy podkreślić, że krzywa $C(S)$ nie jest krzywą uniwersalną dla każdego typu pracy mma. Inny przebieg będzie miała krzywa wyznaczona w badaniu ściskania, inny w badaniu rozciągania [42], jak jednak wykazał Underwood [43], jeśli spośród danych uzyskanych w badaniu ściskanie–rozciąganie wykorzystamy jedynie dane z rozciągania, to możliwe jest uzyskanie krzywej $C(S)$ o analogicznym przebiegu jak dla krzywej wyznaczonej w badaniu czystego rozciągania.

As damage accumulation in the material subjected to cyclic loading progresses, the stress–pseudo strain hysteresis loop either inclines or shifts – depending on the loading mode (Fig. 3) [41] – which may be reflected through a decrease in the value of pseudo stiffness C as function of the internal state S . In the case of such an approach, the constitutive equation may be presented in the form:

$$\sigma = C(S) \cdot \varepsilon^R. \quad (12)$$

For undamaged material the numerical values of stress and pseudo strain are identical, that is: C equals 1. The relation $C(S)$ is a function characteristic for each material and is referred to as the damage characteristic curve, assuming that the material is within the linear range and does not undergo any chemical changes. The curve relates the damage progress S (internal state variable – the cause) to material integrity C (pseudo stiffness – the effect). An example of such relationship is shown in Fig. 4.

The value of pseudo stiffness C may be determined in cyclic loading test (compression, tension, compression–tension). It should be emphasized that a given $C(S)$ curve is not universal across all modes of loading that asphalt mixture may be subjected to. A curve determined in compression test will differ from a curve obtained from tensile test [42]. Nevertheless, as shown by

W Tabl. 1 zebrano opisywane równania konstytutywne dla materiałów sprężystych i lepkosprężystych w stanie niezniszczonym oraz po uwzględnieniu historii obciążenia, stanowiące podstawę teorii VECD.

Underwood [43], if data regarding tension is extracted from the results of a compression–tension test, it is possible to obtain a $C(S)$ curve analogous to that obtained from testing under pure tension.

Table 1. Comparison of constitutive equations for elastic and viscoelastic materials, both in undamaged state and after inclusion of loading history

Tablica 1. Porównanie równań konstytutywnych dla materiałów sprężystych i lepkosprężystych w stanie niezniszczonym oraz po uwzględnieniu historii obciążenia

	Elastic material / Materiał sprężysty	Viscoelastic material / Materiał lepkosprężysty
Undamaged state W stanie niezniszczonym	$\sigma = E\varepsilon$	$\sigma = E_R \varepsilon^R$ elastic-viscoelastic correspondence analogia sprężysto-lepkosprężysta $\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau,$ pseudo strain / pseudoodkształcenie
Incorporation of loading history Po uwzględnieniu historii obciążenia	$\sigma = C(S) \cdot \varepsilon$	$\sigma = C(S) \cdot \varepsilon^R$

3.4. ZASADA RÓWNOWAŻNOŚCI TEMPERATUROWO-CZASOWEJ Z PRZYROSTOWYM NISZCZENIEM

Zasada superpozycji czasowo-temperaturowej (t-TSP) jest dobrze udokumentowaną i powszechnie stosowaną zasadą w analizach lepkosprężystych. Jeżeli prawdziwe jest założenie, że dany materiał spełnia t-TSP, możliwe jest opisanie jego zachowania w uproszczony sposób, a tym samym również ograniczenie zakresu warunków niezbędnych badań. Poprzez poziome przesunięcie (zakładając czas/częstotliwość na osi poziomej) izoterm o określonym współczynniku przesunięcia czasowo-temperaturowego można modelować szeroki zakres wartości temperatury i częstotliwości/czasów obciążenia w jednej krzywej wiodącej. Krzywa wiodąca staje się zależna od zredukowanego czasu lub częstotliwości związanej z izotermami. Współczynniki przesunięcia można uzyskać poprzez przesunięcie wizualne izoterm w funkcję gładką, dopasowanie funkcjami lub procedurą bezfunkcyjną, np. typu Gordon-Shaw [44].

Ogólnie przyjęło się, że zarówno lepiszcza asfaltowe jak i mieszanki mineralno-asfaltowe spełniają założenia zasady t-TSP, jak jednak wykazali Di Benedetto et al. [45], lepiszcza modyfikowane polimerem SBS (zwłaszcza o dużej zawartości – około 7% m/m) jak również mieszanki mineralno-asfaltowe wytworzone z jego użyciem spełniają jedynie

Table 1 presents the described constitutive equations for elastic and viscoelastic materials, both in undamaged condition and after incorporation of loading history. The presented equations serve as the basis for the VECD method.

3.4. THE TIME-TEMPERATURE SUPERPOSITION PRINCIPLE WITH GROWING DAMAGE

The time-temperature superposition principle (t-TSP) is a well-documented and generally recognized principle of viscoelastic analysis. If the assumption is true that the behavior of a given material is governed by the t-TSP, it is possible to describe its performance in a simplified manner and, therefore, limit the required range of laboratory test conditions. A wide range of temperatures and loading times/frequencies may be modeled on a single master curve through horizontal shifting of isotherms (assuming time/frequency on the horizontal axis) by a specific time-temperature shift factor. The master curve becomes dependent on reduced time or isotherm-related frequency. The shift factors may be obtained through visual shifting of the isotherms into a smooth curve, through fitting by functions or procedures that are not function-based, e.g. the Gordon-Shaw type [44].

It is generally recognized that the t-TSP is valid both for bituminous binders and for asphalt mixtures. However,

częściową zasadę superpozycji czasowo-temperaturowej (Pt-TSP), ponieważ możliwe jest wykreślenie krzywej wiodącej modułów sztywności w zależności od zredukowanej częstotliwości, ale niemożliwe jest uzyskanie gładkich wykresów krzywych Blacka, wykresów kąta przesunięcia fazowego oraz wykresów współczynnika Poissona.

W celu opracowania krzywych wiodących badania powinny być prowadzone w zakresie odkształceń, w którym występuje liniowe zachowanie materiałów. W przeciwnym razie materiał nie jest prosty termoreologicznie, a relacje przesunięcia są błędne. Ogólnie uważa się, że limit zakresu LVE wynosi około 50-100 mikrostrainów [46, 47]. Poziom odkształceń oczywiście zależy od materiału, ale również od warunków badania, np. częstotliwości. Jednak jak wykazały doświadczenia [48, 49], beton asfaltowy może zachować swoje termoreologicznie proste zachowanie w warunkach, w których występują duże odkształcenia i rosnące uszkodzenia.

Jako że zmienne C i ε^R z równania (8) są zmiennymi zależnymi od czasu, parametr S również można opisać jako zmienną zależną od czasu. Możliwe jest to dzięki zaproponowanej w [41, 50] procedurze pozwalającej przekształcić wzór (8) z zastosowaniem numerycznych przybliżeń opartych na danych z badań:

$$S(t) = \sum_{i=1}^N \left[-\frac{I}{2}(C_i - C_{i-1})(\varepsilon^R)^2 \right]^{\frac{\alpha}{(1+\alpha)}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{(1+\alpha)}}. \quad (13)$$

Wykorzystując zasadę równoważności temperaturowo-czasowej, równanie (13) można przekształcić do następującej postaci:

$$S(\xi) = \sum_{i=1}^N \left[-\frac{I}{2}(C_i - C_{i-1})(\varepsilon^R)^2 \right]^{\frac{\alpha}{(1+\alpha)}} (\xi_i - \xi_{i-1})^{\frac{1}{(1+\alpha)}}, \quad (14)$$

gdzie:

ξ – zredukowany czas.

Powyższe równania mogą być zapisane w następującej postaci [51]:

$$S_{i+1} = S_i + \left[-\frac{I}{2}(C_i - C_{i-1})(\varepsilon^R)^2 \right]^{\frac{\alpha}{(1+\alpha)}} \Delta \xi_i^{\frac{1}{(1+\alpha)}}. \quad (15)$$

Równanie (15) jest określane jako ściśle równanie VECD. Najlepiej jest stosować je w przypadku prostej

Di Benedetto et al. [45] have shown that SBS-modified binders (especially those with high polymer content – approx. 7% m/m) and mixtures that contain such binders only conform to the partial time-temperature superposition principle (Pt-TSP), since it is possible to plot a single stiffness modulus master curve vs. reduced frequency, but it is impossible to obtain smooth curves on Black diagrams, phase angle charts and Poisson ratio charts.

In order to determine the master curves, the tests should be conducted in the range of strains in which the behavior of the material is linear. Otherwise, the material is not thermorheologically simple and the obtained shift relationships are incorrect. It is generally assumed that the LVE range limit is approx. 50-100 microstrain [46, 47]. Naturally, the strain level depends on the material, but also on the test conditions, e.g. the frequency. However, as shown by previous experiments [48, 49], asphalt concrete may retain its thermorheologically simple behavior even under conditions of high strain and growing damage.

Since the C and ε^R variables from equation (8) are time-dependent, the S parameter may also be described as a time-dependent variable. Procedure proposed in [41, 50] enables such a conversion of equation (8) by means of numerical approximations based on test data:

Applying the time-temperature superposition principle, equation (13) may be converted to the form:

where:

ξ – reduced time.

The above equations may be presented in the following form [51]:

Equation (15) is referred to as the rigorous VECD formulation. It is most useful in cases of simple loading

historii obciążeń, tj. w badaniach jednostajnego rozciągania. Dla złożonej historii obciążeń w cyklicznym badaniu zmęczeniowym równanie to nie jest odpowiednie, ponieważ przy znacznej ilości danych pomiarowych w takim badaniu równanie to może prowadzić do niewłaściwego rozwiązania i znacznych błędów w obliczaniu szkody zmęczeniowej.

Podsumowując, model VECD składa się z dwóch funkcji materiałowych: krzywej przebiegu niszczenia (ang. *damage characteristic curve*) oraz energetycznego kryterium całkowitego zniszczenia (ang. *energy-based failure criterion*). Pierwsza funkcja określa postęp niszczenia w materiale na skutek przyłożonego obciążenia. Druga funkcja, zgodnie z nazwą, określa, kiedy następuje całkowite zniszczenie. Unikalną cechą tych dwóch funkcji jest to, że nie zależą one od temperatury, sposobu obciążenia, wielkości przyłożonych naprężeń i odkształceń oraz historii obciążenia przy założeniu, że materiał znajduje się w liniowym zakresie i nie zachodzą w nim żadne zmiany chemiczne.

4. METODA S-VECD

4.1. ZAŁOŻENIA METODY

Underwood et al. [43] ze względu na niedoskonałości metody VECD opisane w p. 3.4 opracowali uproszczony model rozproszonego niszczenia w ośrodku lepkosprężystym oparty na analizie danych cyklicznych. Ta metoda umożliwia prognozowanie trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych przy różnych amplitudach naprężeń i odkształceń w różnych temperaturach przy użyciu krzywej wzorcowej modułu dynamicznego i danych cyklicznego zmęczenia na podstawie pojedynczej temperatury i pojedynczej amplitudy naprężenia lub odkształcenia. Proponowana funkcja S jest następującej postaci:

$$S_{N+1} = S_N + \left[-\frac{DMR}{2} (C_N - C_{N-1}) (\varepsilon^R)^2 \right]^{\frac{\alpha}{(1+\alpha)}} \cdot (\Delta \xi_i)^{\frac{1}{(1+\alpha)}} (K_1)^{\frac{1}{(1+\alpha)}}, \quad (16)$$

gdzie:

DMR – współczynnik modułów dynamicznych (ang. *dynamic modular ratio*), $DMR = |E^*|_{fp} / |E^*|_{LVE}$,

$|E^*|_{fp}$ – moduł wzorcowy mma (ang. *fingerprint modulus*) wyznaczany przy takiej samej wartości temperatury i częstotliwości, w jakiej prowadzone jest badanie zmęczenia, szczegółowa metoda obliczania podana w [52],

histories, i.e. in monotonic tension tests. However, it is not suitable for more complex loading histories typical of cyclic fatigue tests, since with extensive test data the equation may lead to incorrect solutions and considerable error in accumulated fatigue damage.

In summary, the VECD model consists of two material functions: the damage characteristic curve and the energy-based failure criterion. The first function reflects the progress of damage in the material due to the applied loading. The second, as the name suggests, determines the ultimate point of failure. The unique characteristic of both functions is that they are not dependent on the temperature, the loading mode, the magnitude of the applied stress and strain or the loading history, given the assumption that the material remains in the linear range and does not undergo any chemical changes.

4. THE S-VECD METHOD

4.1. BASIC PRINCIPLES OF THE METHOD

Due to shortcomings of the VECD method described in section 3.4, Underwood et al. [43] developed a simplified viscoelastic continuum damage model based on analysis of cyclic data. The method enables prediction of fatigue life of asphalt mixtures for various amplitudes of stress and strain at various temperatures, using the dynamic modulus master curve and cyclic fatigue data based on a single temperature and a single amplitude of stress or strain. The proposed S function has the following form:

$$S_{N+1} = S_N + \left[-\frac{DMR}{2} (C_N - C_{N-1}) (\varepsilon^R)^2 \right]^{\frac{\alpha}{(1+\alpha)}} \cdot (\Delta \xi_i)^{\frac{1}{(1+\alpha)}} (K_1)^{\frac{1}{(1+\alpha)}}, \quad (16)$$

where:

DMR – dynamic modular ratio, $DMR = |E^*|_{fp} / |E^*|_{LVE}$,

$|E^*|_{fp}$ – fingerprint modulus of the mixture, determined at the temperature and frequency at which the fatigue test is conducted – detailed calculation method is presented in [52],

$|E^*|_{LVE}$ – linear viscoelastic dynamic (complex) modulus - detailed calculation method given in [52],

$\Delta \xi_i$ – reduced time interval between analysis cycles,

K_1 – parameter determined based on cyclic data,

α – material parameter.

$|E^*|_{LVE}$ – zespolony moduł dynamiczny (liniowo lepko-sprężysty), szczegółowa metoda obliczania podana w [52],

$\Delta\xi_i$ – różnica zredukowanych czasów pomiędzy cyklami analizy,

K_1 – parametr opracowany na podstawie danych cyklicznych,

α – parametr zależny od materiału.

Sposób obliczania wymaganych wielkości uzależniony jest od tego, dla którego cyklu obciążenia liczone są wartości pseudoodkształcenia, pseudoszywności i zmiennej stanu wewnętrznego S . Jest to główna różnica pomiędzy modelami VECD i S-VECD.

Metoda uproszczona została opisana szczegółowo w opracowaniu [43]. Zakłada ona rozdzielenie obliczeń na dwie części: niestaloną (pierwszy cykl obciążenia), w której wzrost uszkodzenia nie jest stały, oraz stałą lub cykliczną, w której wzrost uszkodzenia na cykl jest niewielki i przejawia się tylko przy rozciągającej fazie obciążenia.

Rozdział taki jest zasadny, ponieważ w przypadku badań pod obciążeniem cyklicznym szkoda zmęczeniowa wywołana na wczesnym etapie badania jest znacząca. W związku z tym, aby obliczyć pseudoodkształcenie niezbędne do obliczenia szkody zmęczeniowej, należy obliczyć całość splotową. Całka splotowa wykorzystywana jest do obliczenia pseudoodkształcenia w pierwszym cyklu obciążenia. Natomiast dla wszystkich pozostałych cykli wykorzystywana jest uproszczona metoda (17). Pozostałe zależności potrzebne do wyznaczenia krzywej przebiegu niszczenia $C(S)$ są przedstawione w równaniach (18-20) [52]:

$$\varepsilon^R = \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^{\xi} E(\xi - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad \text{dla} \quad \xi \leq \xi_p \\ \left(\varepsilon_{0,ta}^R \right)_{\text{cykl } i} = \frac{1}{E_R} \frac{\beta + 1}{2} \\ \cdot \left(\left(\varepsilon_{0,pp} \right)_i \cdot |E^*|_{LVE} \right) \quad \text{dla} \quad \xi > \xi_p \end{array} \right\}, \quad (17)$$

$$C = \left\{ \begin{array}{l} C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R DMR} \quad \text{dla} \quad \xi \leq \xi_p \\ C^* = \frac{\sigma_{0,ta}}{\varepsilon_{0,ta}^R DMR} \quad \text{dla} \quad \xi > \xi_p \end{array} \right\}, \quad (18)$$

The manner in which the required values are determined depends on the cycle for which the pseudo strain, pseudo stiffness and the internal state variable S are calculated. It is the primary difference between the VECD and S-VECD methods.

The simplified method is described in detail in [43]. It assumes division of calculations into two parts: the transient calculation (the first load cycle), in which the damage increase is not constant, and the constant or cyclic calculation, in which the change in damage per cycle is relatively small and occurs only during the tensile portion of the loading cycle.

Such a division is well-founded, since the damage developed at the early stage of cyclic loading tests is significant. Therefore, in order to determine the pseudo strain needed for damage increment calculation, it is necessary to compute the convolution integral. The convolution is calculated only for the first loading cycle, and the simplified method is applied for the following cycles, as shown in equation (17). The remaining relationships required for determination of the damage characteristic curve $C(S)$ are given in equations (18-20) [52]:

$$\varepsilon^R = \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^{\xi} E(\xi - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad \text{for} \quad \xi \leq \xi_p \\ \left(\varepsilon_{0,ta}^R \right)_{\text{cycle } i} = \frac{1}{E_R} \frac{\beta + 1}{2} \\ \cdot \left(\left(\varepsilon_{0,pp} \right)_i \cdot |E^*|_{LVE} \right) \quad \text{for} \quad \xi > \xi_p \end{array} \right\}, \quad (17)$$

$$C = \left\{ \begin{array}{l} C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R DMR} \quad \text{for} \quad \xi \leq \xi_p \\ C^* = \frac{\sigma_{0,ta}}{\varepsilon_{0,ta}^R DMR} \quad \text{for} \quad \xi > \xi_p \end{array} \right\}, \quad (18)$$

$$dS = \left\{ \begin{array}{l} \left(dS_{\text{transient}} \right)_{\text{timestep } j} = \left[-\frac{DMR}{2} \left(\varepsilon^R \right)_j^2 \Delta C_j \right]^{\frac{\alpha}{(1+\alpha)}} \\ \cdot \left(\Delta \xi_j \right)^{\frac{1}{(1+\alpha)}} \quad \text{for} \quad \xi \leq \xi_p \\ \left(dS_{\text{cyclic}} \right)_{\text{cycle } i} = \left[-\frac{DMR}{2} \left(\varepsilon_{0,ta}^R \right)^2 \Delta C_i \right]^{\frac{\alpha}{(1+\alpha)}} \\ \cdot \left(\Delta \xi_p K_1 \right)^{\frac{1}{(1+\alpha)}} \quad \text{for} \quad \xi > \xi_p \end{array} \right\}, \quad (19)$$

$$dS = \left\{ \begin{array}{l} \left(dS_{nieustalona} \right)_{interwal j} = \left[-\frac{DMR}{2} \left(\varepsilon^R \right)_j^2 \Delta C_j \right]^{\frac{\alpha}{(1+\alpha)}} \cdot \left(\Delta \xi_j \right)^{\frac{1}{(1+\alpha)}} \quad \text{dla} \quad \xi \leq \xi_p \\ \left(dS_{cykliczna} \right)_{cykl i} = \left[-\frac{DMR}{2} \left(\varepsilon_{0,ta}^R \right)^2 \Delta C_i \right]^{\frac{\alpha}{(1+\alpha)}} \cdot \left(\Delta \xi_p K_1 \right)^{\frac{1}{(1+\alpha)}} \quad \text{dla} \quad \xi > \xi_p \end{array} \right\}, \quad (19)$$

gdzie:

$\varepsilon_{0,ta}^R$ – amplituda pseudoodkształcenia przy rozciąganiu dla danego cyklu,

β – parametr do określenia udziału obciążenia rozciągającego w cyklu,

C^* – sieczny moduł pseudosztywności,

$\varepsilon_{0,pp}$ – odkształcenie (pik–pik) dla danego cyklu,

ξ_p – czas obciążenia,

$\sigma_{0,ta}$ – amplituda naprężenia przy rozciąganiu dla danego cyklu,

dS – różnica szkody zmęczeniowej,

ΔC – zmiana pseudosztywności,

$\Delta \xi$ – zmiana czasu zredukowanego,

oraz

$$K_1 = \frac{1}{\xi_f - \xi_i} \cdot \int_{\xi_i}^{\xi_f} \left(f(\xi) \right)^{2\alpha} d\xi, \quad (20)$$

gdzie:

K_1 – współczynnik dopasowania,

$f(\xi)$ – funkcja obciążenia.

Parametr α jest wielkością zależną od właściwości materiału. Zaproponowano kilka wzorów do oszacowania wartości tej stałej, odnosząc ją do właściwości lepko-sprężystych mieszanek mineralno-asfaltowych. Lee i Kim [40, 53] próbowali powiązać wielkość α z nachyleniem m w centralnej części krzywej wiodącej modułu sztywności dla zależności $\log E(t) - \log(t)$. Zasugerowano, że najbardziej odpowiednie jest użycie $\alpha = 1/m$ dla badań w trybie kontrolowanego naprężenia oraz $\alpha = 1/m + 1$ dla badań w trybie kontrolowanego odkształcenia.

Po określeniu pseudoodkształceń, pseudosztywności C oraz zmiennej stanu wewnętrznego S , przebieg krzywej

where:

$\varepsilon_{0,ta}^R$ – the pseudo strain tension amplitude in the given cycle,

β – factor reflecting the duration of tension in the cycle,

C^* – pseudo secant modulus,

$\varepsilon_{0,pp}$ – the peak-to-peak pseudo strain amplitude in the given cycle,

ξ_p – reduced loading pulse time,

$\sigma_{0,ta}$ – the tension stress amplitude in the given cycle,

dS – damage growth,

ΔC – change in pseudo stiffness,

$\Delta \xi$ – change in reduced time,

and

$$K_1 = \frac{1}{\xi_f - \xi_i} \cdot \int_{\xi_i}^{\xi_f} \left(f(\xi) \right)^{2\alpha} d\xi, \quad (20)$$

where:

K_1 – fitting coefficient,

$f(\xi)$ – loading function.

The α parameter is dependent on material properties. Several formulas were proposed in order to evaluate it by associating its value with viscoplastic properties of asphalt mixtures. Lee and Kim [40, 53] tried to relate the value of α to the slope m in the central section of the stiffness modulus $\log E(t) - \log(t)$ master curve. It was suggested that it is most appropriate to adopt $\alpha = 1/m$ for controlled stress tests and $\alpha = 1/m + 1$ for controlled strain tests.

After determination of pseudo strains, pseudo stiffness C and the internal state variable S , the $C(S)$ curve may be fitted to the form of power function [37] (21) or exponential function [51, 54] (22):

$$C(S) = 1 - C_{11} \cdot S^{C_{12}}, \quad (21)$$

$$C(S) = e^{aS^b}, \quad (22)$$

where:

C_{11} , C_{12} , a , b – fitting coefficients.

The decision on which form of the model should be used depends on the character of the assessed mixture. As of yet, no clear reasons have been identified that would explain why the behavior of a given mixture follows one of the functions presented above rather than the other one.

$C(S)$ można dopasować do postaci funkcji potęgowej [37] (21) lub wykładniczej [51, 54] (22):

$$C(S) = 1 - C_{11} \cdot S^{C_{12}}, \quad (21)$$

$$C(S) = e^{aS^b}, \quad (22)$$

gdzie:

C_{11} , C_{12} , a , b – współczynniki dopasowania.

Decyzja o tym, którą formę modelu wykorzystać, zależy od zachowania ocenianej mieszanki. Do tej pory nie zidentyfikowano wyraźnego powodu, dla którego zachowanie danej mieszanki wyrażone krzywą $C(S)$ jest bardziej zbliżone do przebiegu jednej z powyższych funkcji.

4.2. KRYTERIA ZMĘCZENIOWE

4.2.1. Uwagi ogólne

Krzywa przebiegu niszczenia $C(S)$ nie może być zastosowana do oceny trwałości zmęczeniowej poszczególnych mieszanek mineralno-asfaltowych. W celu obiektywnego i wiarygodnego porównywania mma między sobą z wykorzystaniem metody S-VECD naukowcy poszukiwali więc kryteriów zmęczeniowych. Początkowe próby polegały na określeniu liczby cykli powodujących określony spadek sztywności, np. o 50%. Reese [55] jako kryterium zmęczeniowe zastosował maksymalną wartość kąta przesunięcia fazowego, po której następuje gwałtowny spadek wartości, mający odpowiadać propagacji makropęknięć (Rys. 5). Ta metoda jest stosowana doświadczalnie w procedurze AASHTO TP107 [56] dla badania bezpośredniego cyklicznego rozciągania w urządzeniu Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). Jednak spadek wartości kąta przesunięcia fazowego powinien być traktowany jako wskaźnik zniszczenia, a nie jako kryterium zmęczeniowe w modelu predykcyjnym. Kryterium zmęczeniowe powinno opierać się na takich podstawowych wielkościach otrzymywanych bezpośrednio z badań, jak: naprężenie, odkształcenie, wartość energii odkształcenia. Dodatkowo powinno być niezależne od historii obciążenia próbki.

W 2010 roku [57] przedstawiono kryterium zmęczeniowe dla modelu S-VECD, które zakłada, że uszkodzenie występuje wtedy, gdy pseudoszywność C zmniejsza się do wartości krytycznej C_f . Jednak badacze zaobserwowali w swoich doświadczeniach dużą zmienność wartości C_f . Dlatego też parametru tego nie można uznać za niezawodne kryterium zmęczeniowe [58].

4.2. FATIGUE CRITERIA

4.2.1. General remarks

The $C(S)$ damage characteristic curve alone cannot serve as the basis for comparisons between different asphalt mixtures. Therefore, in order to enable objective and reliable comparisons between various mixtures using the S-VECD method, the scientists attempted to determine adequate failure criteria. First trials consisted in determination of the number of load cycles which resulted in a specific decrease in stiffness, e.g. by 50%. Reese [55] used the fatigue criterion based on the maximum value of phase angle, after which a rapid decrease in its value occurs, probably representing macro-crack propagation (Fig. 5). This method is applied in the test procedure AASHTO TP107 [56] for direct cyclic tension test in the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). However, while the decrease in phase angle value may be treated as an indication of failure, it should not be adapted as a fatigue criterion in a predictive model. A fatigue criterion should be relied to basic quantities determined directly from the tests, such as: strain, stress, or strain energy. Moreover, it should be independent of the loading history of the specimen.

In 2010 a fatigue criterion for the S-VECD was presented [57], which assumes that failure occurs at the point at which the pseudo stiffness C reaches the critical value C_f . However, the researchers observed considerable variability of C_f in their experiments. Therefore, this parameter should not be considered a universally reliable fatigue criterion [58].

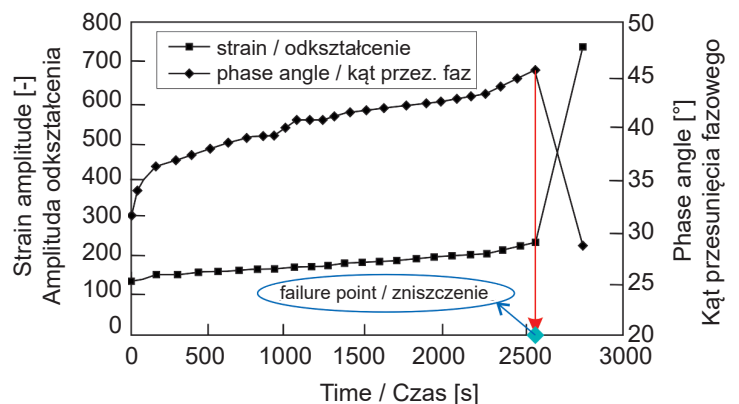


Fig. 5. The plots of phase angle and strain amplitude (measured on specimen) vs. time [41]

Rys. 5. Zależność kąta przesunięcia fazowego oraz amplitudy odkształceń mierzonej na próbce od czasu [41]

Później rozważano również zastosowanie podejścia oparteego na energii rozproszonej jako możliwego kryterium zmęczenia. Jednak wymagałoby to dodatkowych analiz, przede wszystkim ze względu na brak możliwości uchwycenia przez model S-VECD rzeczywistej zmienności kąta przesunięcia fazowego. Sabouri i Kim [59] opracowali niezależnie od sposobu obciążenia kryterium zmęczenia jako szybkość zmiany uśrednionej uwolnionej energii pseudoodkształcenia przypadającej na cykl w całej historii obciążenia aż do zniszczenia G^R . Kryterium opisane przez Sabouriego i Kima eliminuje niedociągnięcia podobnej metody, którą zaproponowali Zhang et al. [60]. Ponadto Wang i Kim [58] opracowali dodatkowe kryterium D^R , które ma na celu zmniejszenie wrażliwości wyniku związanej z ekstrapolacją danych. W kolejnych punktach opisano poszczególne kryteria zmęczenia.

4.2.2. Trwałość zmęczenia N_f

Bezpośrednim zastosowaniem metody S-VECD jest przewidywanie liczby cykli do zniszczenia N_f dla konkretnych danych wejściowych. Takie analizy mogą być wykonywane w jednym punkcie lub dla szeregu punktów w celu scharakteryzowania materiału w szerszym zakresie. Równania trwałości zmęczenia w metodzie S-VECD wraz z wyprowadzeniami podano w [52] dla przypadków kontrolowanego odkształcenia jak i kontrolowanego naprężenia, dla uszkodzeń opisanych zarówno funkcją wykładniczą, jak i potęgową.

4.2.3. Kryterium zniszczenia G^R

Kryterium zniszczenia G^R zostało opracowane przez Sabouriego i Kima [59]. Jest to modyfikacja kryterium G_0^R , które opracowali zaledwie rok wcześniej Zhang et al. [60], okazało się jednak niepraktyczne w zastosowaniu, ponieważ było zależne od sposobu obciążenia próbek. Nowe kryterium G^R jest definiowane jako szybkość zmiany uśrednionej uwolnionej energii pseudoodkształcenia przypadającej na cykl w całej historii obciążenia aż do zniszczenia. Opisano je za pomocą wzoru:

$$G^R = \frac{\int_0^{N_f} W_C^R dN}{N_f} = \frac{\int_0^{N_f} \frac{1}{2}(1-C)(\varepsilon_{0,ta}^R)^2 dN}{N_f^2}. \quad (23)$$

W celu prawidłowego oszacowania właściwości zmęczenia mieszanek mma za pomocą kryterium G^R należy

An approach based on dissipated energy was also considered later as a possible fatigue criterion. Nevertheless, such an approach would have required additional analyses, mainly due to the fact that the S-VECD model is not capable of reflecting the actual variability of phase angle. Sabouri and Kim [59] developed a loading-mode-independent fatigue criterion based on the rate of change of the averaged released pseudo strain energy value per cycle throughout the loading history up to failure G^R . The criterion proposed by Sabouri and Kim eliminates the shortcomings of a similar method presented earlier by Zhang et al. [60]. Wang and Kim [58] developed an additional criterion D^R , which is meant to reduce the sensitivity of the results to data extrapolation. Specific fatigue criteria are described in the following sections.

4.2.2. Fatigue life N_f

The S-VECD model may be directly applied to prediction of the number of cycles to failure N_f for specific input data. Such analyses may be performed for one point or for multiple points in order to characterize the material in a more detailed manner. Fatigue life equations used in the S-VECD method with their derivations are given in [52] for cases of controlled strain and controlled stress, for damage described both by exponential and power functions.

4.2.3. The G^R failure criterion

The G^R failure criterion was developed by Sabouri and Kim [59]. It comprises a modification of the G_0^R criterion, which was presented only a year earlier by Zhang et al. [60], but proved impractical in application due to its dependence on specimen loading mode. The new G^R criterion is defined as the rate of change of the averaged released pseudo strain energy value per cycle throughout the loading history up to failure. It is expressed by the following formula:

$$G^R = \frac{\int_0^{N_f} W_C^R dN}{N_f} = \frac{\int_0^{N_f} \frac{1}{2}(1-C)(\varepsilon_{0,ta}^R)^2 dN}{N_f^2}. \quad (23)$$

In order to correctly evaluate the fatigue properties of a mixture using the G^R criterion, it is necessary to conduct at least three tests under different conditions (e.g. at different temperatures).

przeprowadzić co najmniej trzy badania przy różnych warunkach (np. różnych wartościach temperatury).

Zauważono, że zależność trwałości zmęczeniowej wyrażonej w cyklach do zniszczenia N_f i wartości G^R przedstawionych na wykresie w skali logarytmicznej (log–log) układa się w zależność liniową niezależną od temperatury i, co ważne, niezależną od trybu obciążenia próbki w badaniu bezpośredniego cyklicznego rozciągania. Kryterium zostało zweryfikowane dla trzech trybów obciążenia próbki: w trybie kontrolowanego odkształcenia siłownika (*crosshead-controlled*) – CX, w trybie kontrolowanego naprężenia (*stress-controlled*) – CS i w trybie kontrolowanego odkształcenia na próbce (*on-specimen strain-controlled*) – COS [59]. Ranking badanych mma można prowadzić, porównując szacowaną trwałość zmęczeniową N_f przy konkretnej wartości G^R , np. $G^R = 100$ [60].

4.2.4. Kryterium zniszczenia D^R

Kolejnym krokiem w doskonaleniu wyznaczania trwałości zmęczeniowej metodą S-VECD było opracowanie kryterium zmęczeniowego D^R . Kryterium to zostało zaproponowane przez Wang [58]. Zostało ono opracowane w celu zmniejszenia wrażliwości wyniku związanej z ekstrapolacją danych.

Jak zaznaczono powyżej, stosując kryterium G^R nie można oszacować właściwości materiału związanych z uszkodzeniem zmęczeniowym na podstawie pojedynczej próby zmęczeniowej. Wymagana jest regresja liniowa z wykorzystaniem co najmniej trzech zmierzonych punktów danych w skali logarytmicznej. Ponieważ regresja musi być wykonana w skali log–log, współczynniki regresji są w dużym stopniu uzależnione od niepewności pomiarowej. Ponadto, kiedy kryterium zniszczenia G^R jest stosowane do prognozowania trwałości nawierzchni, trwałość zmęczeniowa w skali logarytmicznej musi być ekstrapolowana ze względu na różnice pomiędzy poziomami odkształceń stosowanymi podczas badań w laboratorium i występującymi na odcinkach rzeczywistych w terenie. W związku z tym niepewność związana z prawdziwym uszkodzeniem materiału przy długich cyklach roboczych ulega dalszemu pogłębieniu.

Kryterium D^R jest zdefiniowane jako średnia redukcja pseudosztywności od początku badania do zniszczenia. Opisano je wzorem (24):

It was noted that the relationship between the number of cycles to failure N_f and the G^R value presented on a log–log chart is linear, temperature-independent and, most importantly, independent of the specimen loading mode in the direct cyclic tension test. The criterion was verified for three loading modes: crosshead-controlled (CX), stress-controlled (CS) and on-specimen strain-controlled (COS) [59]. The tested asphalt mixtures may be ranked through comparison of their predicted fatigue life N_f at a specific G^R value, e.g. $G^R = 100$ [60].

4.2.4. The D^R failure criterion

Another step in refinement of fatigue life determination using the S-VECD method was the development of the D^R fatigue criterion. The criterion was proposed by Wang [58]. It was developed in order to reduce the sensitivity of the results to data extrapolation.

As mentioned above, with the G^R criterion it is impossible to predict the fatigue-related properties of the material based on a single fatigue test. It is necessary to calculate linear regression based on a minimum of three measured data points on a logarithmic scale. Since the regression is performed on a log–log scale, the regression coefficients are affected by the measurement uncertainty to a considerable degree. Moreover, when the G^R failure criterion is used for prediction of pavement life, fatigue life must be extrapolated on the logarithmic scale due to differences between the strain levels used in laboratory tests and real strains occurring in field. Therefore, the uncertainty related to real material damage under long service cycles is further heightened.

The D^R criterion is defined as the average reduction in pseudo stiffness from the start of the test to failure. It is expressed by the equation:

$$D^R = \frac{\int_0^{N_f} (1 - C) dN}{N_f}. \quad (24)$$

It is used simultaneously with the G^R failure criterion, supplementing the first criterion without depreciation of its significance.

$$D^R = \frac{\int_0^{N_f} (1-C) dN}{N_f}. \quad (24)$$

Jest ono stosowane równolegle z kryterium zniszczenia G^R i uzupełnia je, nie zmniejszając jego znaczenia.

4.3. DANE WEJŚCIOWE DO METODY S-VECD

4.3.1. Informacje ogólne

Koncepcja uproszczonego modelu rozproszonego niszczenia w ośrodku lepkosprężystym (S-VECD) wymaga, jak już wcześniej wspomniano, danych dostarczonych z badań wykonanych w aparacie AMPT, znanym również jako Simple Performance Tester (SPT), lub równoważnym urządzeniu zapewniającym odpowiednie warunki w zakresie przyłożonego obciążenia, podatności systemu oraz rejestracji odpowiedzi próbki. Próbka wykorzystywana do badań jest obciążana osiowo w sposób cykliczny, w odróżnieniu od VECD, gdzie próbka poddana jest jednostajnemu rozciąganiu. Wykonanie badań wymaga przyłożenia mniejszych sił, co jest korzystne ze względu na możliwości AMPT. W przypadku VECD często wymagane jest obciążenie przewyższające możliwości aparatu, co wymusza stosowanie pras o większych zakresach siły. Standardowo w S-VECD stosuje się częstotliwość obciążenia 10 Hz.

Do określenia zachowania m według metody S-VECD potrzebne są dwa rodzaje badań:

- 1) Zespolony moduł dynamiczny według AASHTO TP79 [47] dla określenia zachowania m w zakresie liniowej lepkosprężystości.
- 2) Cykliczne rozciąganie jednoosiowe w kontrolowanym odkształceniu siłownika (ang. *controlled crosshead* (CX) *cyclic direct tension*) w celu określenia krzywej przebiegu niszczenia oraz energetycznego kryterium całkowitego według AASHTO TP107 [56].

Obydwa badania prowadzi się na próbkach walcowych wyciętych z rdzeni o średnicy 150 mm zagęszczonych w prasie żyratorowej.

4.3.2. Badanie zespolonego modułu dynamicznego

Badanie dynamicznego modułu zespolonego prowadzone wg AASHTO TP79 [47] wykonuje się na próbkach

4.3. INPUT DATA FOR THE S-VECD METHOD

4.3.1. General information

As mentioned above, the concept of the simplified viscoelastic continuum damage (S-VECD) model requires data from tests conducted in the AMPT device, also known as the Simple Performance Tester (SPT), or in an equivalent device providing the necessary conditions in terms of loading capacity, system compliance and response recording. The tested specimen is subjected to uniaxial loading in a cyclic manner, in contrast to the VECD, in which the specimen is subjected to monotonic tension. The test procedure requires loading of lesser magnitude, which is advantageous due to limitations of the AMPT. In the case of VECD, greater loading is required, often exceeding the capacity of the device and necessitating the use of presses with greater force ranges. The standard loading frequency used in the S-VECD is 10 Hz.

In order to determine the behavior of an asphalt mixture according to the S-VECD model, two types of tests are necessary:

- 1) Complex dynamic modulus according to AASHTO TP79 [47] for determination of mix behavior in the range of linear viscoelasticity.
- 2) Controlled crosshead (CX) cyclic direct tension test for determination of the damage characteristic curve and the energy criterion according to AASHTO TP107 [56].

Both tests are conducted on cylindrical specimens cut from 150 mm diameter cores compacted in a gyratory press.

4.3.2. Dynamic modulus testing

Testing of the dynamic modulus according to AASHTO TP79 [47] is performed on cylindrical specimens of dimensions: $\Phi = 100$ mm, $h = 150$ mm. Specimens are prepared and subjected to short-term aging according to the AASHTO PP60 [61]. The test procedure is well-known, and the results obtained for asphalt mixtures used in Poland were described by Jaczewski and Mejłun [62].

4.3.3. Fatigue in cyclic uniaxial tension test

Fatigue testing in cyclic uniaxial tension according to AASHTO TP107 [56] is performed on cylindrical

walcowych o wymiarach: $\Phi = 100$ mm, $h = 150$ mm. Próbkę przygotowuje się i poddaje starzeniu krótkoterminowemu zgodnie z normą AASHTO PP60 [61]. Procedura badawcza jest znana, a uzyskiwane wyniki na mieszankach mineralno-asfaltowych stosowanych w Polsce zostały opisane m.in. przez Jaczewskiego i Mejłuna w [62].

4.3.3. Zmęczenie w badaniu cyklicznego rozciągania jednoosiowego

Badanie zmęczenia przy cyklicznym rozciąganiu jednoosiowym prowadzone wg AASHTO TP107 [56] wykonuje się na próbkach walcowych o wymiarach: $\Phi = 100$ mm, $h = 130$ mm. Próbkę przygotowuje się i poddaje starzeniu krótkoterminowemu zgodnie z normą AASHTO PP60 [61].

Badanie polega na poddaniu próbki cyklicznemu jednoosiowemu rozciąganiu ze stałą częstotliwością 10 Hz, w temperaturze odpowiednio dobranej ze względu na wartość PG zastosowanego w próbce lepiszcza, ale nie wyższej niż 21°C. W badaniu siła i kąt przesunięcia fazowego mierzone są na siłowniku, natomiast odkształcenie – na trzech czujnikach LVDT przyklejonych do próbki.

Badanie wykonuje się w dwóch etapach, w pierwszym próbka poddawana jest naprężeniu wywołującemu odkształcenie w zakresie 50-75 mikrostrainów, podczas którego wyznaczany jest moduł wzorcowy (*fingerprint modulus*) (16). W kolejnym kroku wykonywane jest właściwe badanie zmęczenia przy założonym poziomie amplitudy odkształceń (dla pierwszej próbki norma AASHTO TP107 sugeruje badanie przy amplitudzie odkształcenia 300 mikrostrainów). Badanie prowadzone jest do momentu, w którym mikropęknięcia skumulują się w widoczne makropęknięcia i dojdzie do zniszczenia próbki. Badanie, jak opisano w p. 4.2.2. oraz p. 4.2.3., przeprowadza się dla co najmniej trzech poziomów odkształcenia.

5. PRZYKŁADOWE WYKORZYSTANIE METODY VECD

Wykorzystanie metody S-VECD umożliwia przeprowadzenie ilościowej analizy szkody zmęczeniowej po określonym czasie eksploatacji. Dane potrzebne do obliczeń należy pozyskać z badań zespolonego modułu dynamicznego opisanego w p. 4.3.2. oraz badań zmęczenia w badaniu cyklicznego rozciągania jednoosiowego opisanego w p. 4.3.3. Pozwolą one ustalić współczynniki w równaniu krzywej $C(S)$ (wzór (21) lub (22)) oraz równania

specimens of dimensions: $\Phi = 100$ mm, $h = 130$ mm. Specimens are prepared and subjected to short-term aging according to the AASHTO PP60 [61].

The test consists in subjecting the specimen to cyclic uniaxial tension at the constant frequency of 10 Hz and the temperature adequate to the PG value of the binder used in the specimen, but not greater than 21°C. During the test the force and phase angle are measured on the cross-head and the strain is measured by three LVDT sensors attached to the specimen.

The test is conducted in two stages. During the first stage the specimen is subjected to stress resulting in strain in the range of 50-75 microstrain, enabling determination of the fingerprint modulus – cf. equation (16). The second stage consists in the proper fatigue testing at the adopted strain amplitude (AASHTO TP107 suggests the amplitude of 300 microstrain for the first specimen). The test continues until micro-cracks accumulate into a visible macro-crack, leading to specimen failure. The test, as described in sections 4.2.2. and 4.2.3., is conducted for at least three strain levels.

5. AN EXAMPLE APPLICATION OF VECD

Application of the S-VECD method enables quantitative analysis of accumulated damage after a given period of service. Data for calculations should be obtained from dynamic modulus tests described in section 4.3.2. and fatigue tests under uniaxial cyclic tension described in section 4.3.3. They enable determination of coefficients in the equation of the $C(S)$ curve (equation (21) or (22)) and the fatigue criteria (equations (23) and (24)). When implemented in dedicated analytical tools, the above relationships enable determination of the accumulated damage in chosen years of pavement service.

Fig. 6 shows a quantitative comparison of damage after 30 years of service for four pavement structures. In two structures all of the asphalt layers consisted of mixtures based on highly polymer-modified binders PMB HiMA (base course and binder course of PMB 45/80-80 HiMA, wearing course of PMB 65/105-80 HiMA). The two variants differed in the total thickness of the asphalt layers: 16 cm and 24 cm. Two other structures contained highly modified bitumen PMB 45/80-80 HiMA only in the asphalt base course, with paving grade bitumen 35/50 in

kryteriów zmęczeniowych (wzory (23) oraz (24)). Powyższe relacje zaimplementowane w wyspecjalizowanych narzędziach analitycznych umożliwiają określenie szkody zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni w konkretnych latach eksploatacji.

the binder course and modified bitumen PMB 45/80-55 in the wearing course – also in two thickness variants (16 cm and 24 cm).

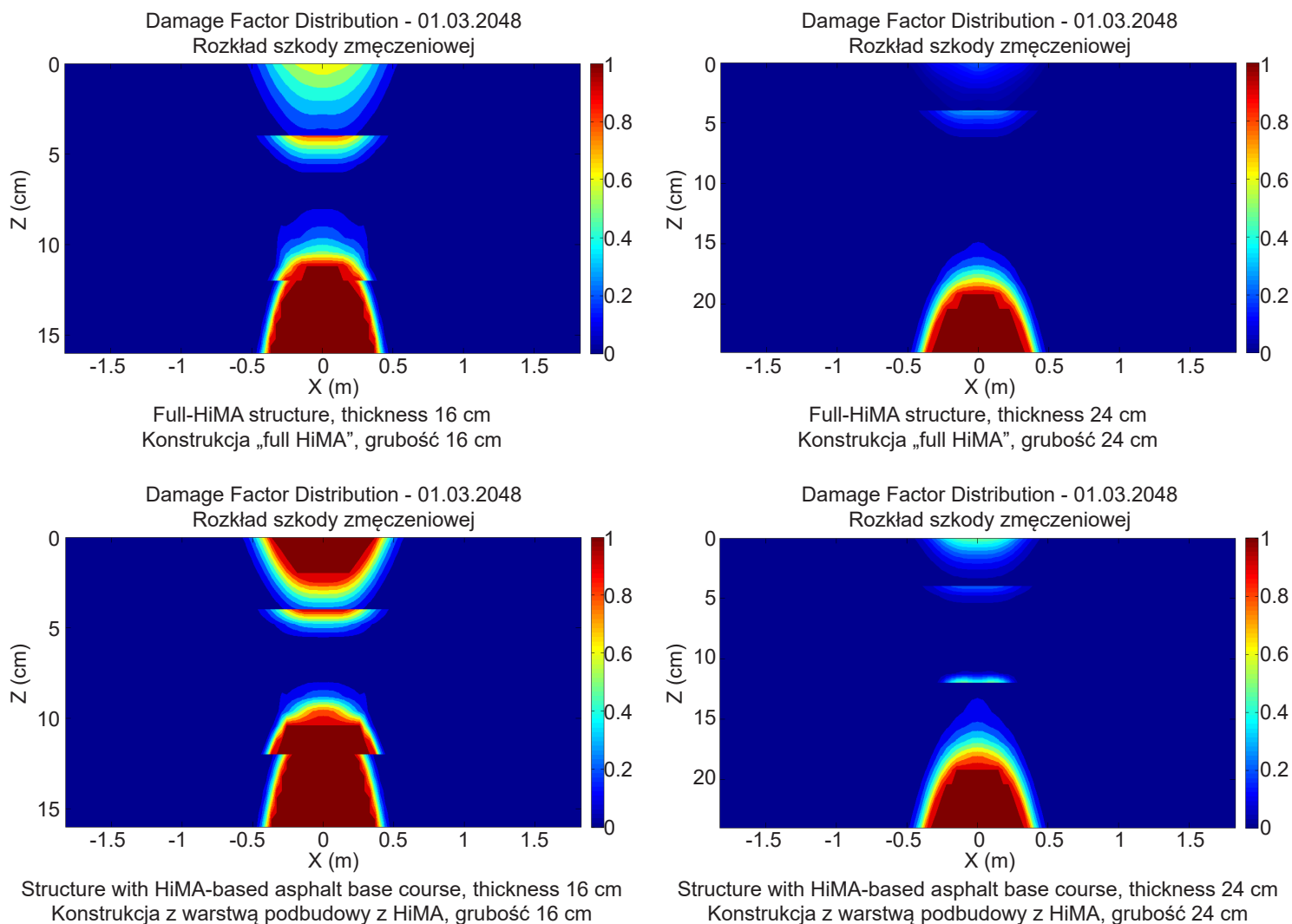


Fig. 6. The effect of materials and thickness of the asphalt layers on damage predicted according to the S-VECD method [20]

Rys. 6. Wpływ materiałów i grubości na szkodę zmęczeniową szacowaną wg S-VECD [20]

Na Rys. 6 przedstawiono porównanie ilości szkody zmęczeniowej po okresie eksploatacji 30 lat dla czterech konstrukcji nawierzchni. W dwóch konstrukcjach wszystkie warstwy asfaltowe wykonane były na bazie lepiszczy wysokomodyfikowanych PMB HiMA (warstwa podbudowy i wiążąca PMB 45/80-80 HiMA, ścieralna PMB 65/105-80 HiMA), w dwóch wariantach grubości (16 cm

Analyzing the matrix of results presented in respective diagrams (Fig. 6), one may observe that lower accumulation of damage in the cross section occurs for the variants with greater total thickness (24 cm instead of 16 cm) – both for full HiMA structures and for structures containing HiMA-based mix only in the base course. It is also evident that the full HiMA structure is more advantageous

oraz 24 cm). Dwie konstrukcje zawierały w warstwie podbudowy lepiszcze wysokomodyfikowane PMB 45/80-80 HiMA, natomiast w warstwie wiążącej asfalt drogowy 35/50, a w warstwie ścieralnej lepiszcze modyfikowane PMB 45/80-55 – również w dwóch wariantach grubości (16 cm oraz 24 cm).

Analizując matrycę wyników przedstawionych na poszczególnych diagramach (Rys. 6), można zaobserwować mniejsze nagromadzenie szkody zmęczeniowej w przekroju konstrukcji przy zwiększeniu łącznej grubości warstw asfaltowych z 16 cm do 24 cm – zarówno w przypadku konstrukcji *full HiMA*, jak również w przypadku konstrukcji z lepiszczem HiMA tylko w warstwie podbudowy. Widoczny jest również korzystny wpływ zastosowania konstrukcji *full HiMA* w stosunku do konstrukcji, w której lepiszcze wysokomodyfikowane zastosowano jedynie w warstwie podbudowy. Oba powyższe wnioski są zgodne z wynikami badań uzyskiwanymi w różnych programach badawczych [12, 17-20].

6. WNIOSKI

W artykule omówiono model VECD wraz z jego późniejszą modyfikacją S-VECD. To niezwykle ciekawe narzędzie pozwala porównywać różne mieszanki mineralno-asfaltowe oraz przewidywać ich trwałość zmęczeniową.

Ostatecznym celem wykorzystania metody S-VECD jest jej wdrożenie w projektowaniu mechanicznym konstrukcji nawierzchni. Ponieważ pozwala ona uwzględnić historię obciążenia oraz postępujące niszczenie w materiale ciągłym, możliwe jest wiarygodne określenie trwałości zmęczeniowej również w przypadku nawierzchni, które zawierają innowacyjne materiały o ponadstandardowych właściwościach.

INFORMACJE DODATKOWE

Prace badawcze związane z niniejszą publikacją zostały wykonane w ramach programu badawczego „Wykorzystanie niestandardowych metod projektowania nawierzchni z asfaltami wysokomodyfikowanymi ORBITON HiMA”, prowadzonego przez ORLEN Asfalt sp. z o.o.

than the structure containing HiMA binder only in the asphalt base course. Both the above conclusions are in agreement with the results obtained in various research programs [12, 17-20].

6. CONCLUSIONS

The article presents the VECD method along with its later S-VECD modification – a very interesting tool enabling comparison of different asphalt mixtures and prediction of their fatigue life.

The ultimate objective in terms of S-VECD application is the introduction of the method in mechanistic pavement design. Since the method enables incorporation of the loading history and continuum damage progress, it makes it possible to determine the fatigue life reliably also in the case of pavements containing innovative materials with superior, non-standard properties.

ACKNOWLEDGMENTS

Research work related to this publication was performed within the research project “Application of non-standard methods in design of pavements with highly modified bitumens ORBITON HiMA” conducted by ORLEN Asfalt sp. z o.o.

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] Mackiewicz P.: Fatigue cracking in road pavement. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **356**, 1, 2018, 012014, DOI: 10.1088/1757-899X/356/1/012014
- [2] West R., Timm D., Willis J.R., Powell B., Tran N., Watson D., et al. Phase IV NCAT Pavement Test Track Findings: Final Report. NCAT Report 12-10. 2012
- [3] West R., Timm D., Willis R., Powell B., Tran N., Watson D., et al.: Phase IV NCAT Pavement Test Track Findings, Final Report. National Center for Asphalt Technology NCAT, Auburn University, 2013
- [4] Molenaar A., van de VerPoot M.R., Liu X., Scarpas A., Scholten E.J., Klutz R.: Modified Base Courses for Reduced Pavement Thickness and Increased Longevity. Proceedings of the International Conference on Perpetual Pavement, Columbus, OH, 2009

- [5] Kluttz R., Willis R., Molenaar A., Scarpas T., Scholten E.: Fatigue Performance of Highly Modified Asphalt Mixtures in Laboratory and Field Environment. 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, RILEM Bookseries, 4, 2012, 687-696, DOI: 10.1007/978-94-007-4566-7_67
- [6] Kluttz R.Q., Jellema E., Woldekidan M.F., Huurman M.: Highly modified bitumen for prevention of winter damage in OGFCs. In: Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements. Proceedings of the 2013 Airfield and Highway Pavement Conference. 2013, 1075-1087
- [7] Timm D.H.: Full-scale structural characterization of a highly-polymer-modified asphalt pavement. TRB 90th Annual Meeting, Transportation Research Record, **250**, 2011, 1-16
- [8] Timm D.H., Willis J.R., Kluttz R.Q., Powell R.: Pavement Rehabilitation Using High Polymer Asphalt Mix. In: 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress. TRB 91st Annual Meeting, 2012. 1-17
- [9] Tabor Z.: Doświadczenia ze stosowania asfaltów wysokomodyfikowanych na drogach wojewódzkich województwa śląskiego. In: Krakowskie Dni Nawierzchni, 2019, https://nawierzchniedrogowe.konferencjespecjalistyczne.pl/images/pdf/KDN19_Prezentacje/11ZTabor_Doswiadczenia_ze_stosowania_asfaltow_wysokomodyfikowanych_na_drogach_wojewodzkich_wojewodztwa_slaskiego.pdf
- [10] Błażejowski K., Wójcik-Wiśniewska M., Peciakowski H., Olszacki J.: The Performance of a Highly Modified Binders for Heavy Duty Asphalt Pavements. Transportation Research Procedia, **14**, 2016, 679-684, DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.331
- [11] Wesółowska M., Ryś D.: Analysis of the Fatigue Life of Neat and Modified Bitumens Using Linear Amplitude Sweep Test. Road and Bridges - Drogi i Mosty, **17**, 4, 2018, 317-336, DOI: 10.7409/rabdim.018.020
- [12] Bańkowski W.: Analysis of fatigue life of asphalt concretes considering different types of mixtures and binders. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **17**, 4, 2018. 253-270, DOI: 10.7409/rabdim.018.016
- [13] Judycki J., Jaskuła P., Dołżycki B., Pszczoła M., Alenowicz J., Stienss M., et al.: Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. GDDKiA, 2013, 1-117
- [14] AASHTO Mechanistic Empirical Pavement Design Guide: A Manual Practice. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008
- [15] Judycki J., Jaskuła P., Pszczoła M., Ryś D., Jaczewski M., Alenowicz J., et al.: Analizy i Projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. WKiŁ, Warszawa, 2014, 452p
- [16] Zbiciak A., Brzeziński K.: Porównanie procedur projektowania nawierzchni podatnych i półsztywnych na podstawie starego i nowego polskiego katalogu typowych konstrukcji. w: Teoretyczne podstawy budownictwa. Tom III Konstrukcje inżynierskie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013, 103-114
- [17] Jaskuła P., Bańkowski W., Alenowicz J., Sybilski D., Dołżycki B., Gajewski M., et al.: Asfalty drogowe i modyfikowane w polskich warunkach klimatycznych, kompleksowa charakterystyka mieszanek mineralno-asfaltowych w warunkach laboratoryjnych z uwzględnieniem mechanizmów zniszczenia nawierzchni. Raport RID, 2018, 1-25
- [18] Błażejowski K., Wójcik-Wiśniewska M., Baranowska W., Ostrowski P.: Poradnik asfaltowy 2021, Płock: ORLEN Asfalt, 2021. https://www.ornen-asfalt.pl/PL/Informacje-Techniczne/Documents/PDF/Poradnik_2021.pdf
- [19] Błażejowski K., Wójcik-Wiśniewska M., Baranowska W., Ostrowski P.: Highly Modified Binders. ORLEN Asfalt; Płock, 2018. <https://www.ornen-asfalt.pl/PL/InformacjeTechniczne/Strony/Nasze-Publikacje.aspx>
- [20] Błażejowski K., Ostrowski P., Wójcik-Wiśniewska M., Baranowska W.: Mieszanki i Nawierzchnie z ORBITON HiMA. ORLEN Asfalt, Płock, 2020, https://www.ornen-asfalt.pl/PL/InformacjeTechniczne/Documents/PDF/Mieszanki_i_Nawierzchnie_z_ORBITON_HiMA_2020_pl.pdf
- [21] Schapery R.A.: A theory of crack initiation and growth in viscoelastic media - III. Analysis of continuous growth. International Journal of Fracture, **11**, 4, 1975, 549-562
- [22] Schapery R.A.: Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media. International Journal of Fracture, **25**, 3, 1984, 195-223
- [23] Schapery R.A.: A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, **38**, 2, 1990, 215-253
- [24] Monismith C., Epps J.A., Kasianchuck D.A., McLean D.B.: Asphalt Mixture Behavior In Repeated Flexure. University of California, Berkeley, 1970
- [25] Shook J.F., Finn F.N., Witczak M.W., Monismith C.: Thickness Design of Asphalt Pavements - The Asphalt Institute Method. Proc. of 5th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1, Delft, Netherlands, 1982, 17-44
- [26] Jaczewski M., Judycki J.: Adaptacja francuskich kryteriów zmęzeniowych do projektowania nawierzchni półsztywnych w warunkach polskich. Drogownictwo, **62**, 5, 2012, 164-170
- [27] Navrhování vozovek pozemních komunikací. Technické Podmínky, TP170, 2010, http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_170_Dodatek_1.pdf
- [28] RVS 03.08.68 Rechnerische Dimensionierung von Asphaltstraßen. Die Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV), 2018

- [29] *Ryś D., Jaskuła P., Jaczewski M., Pszczoła M.*: Application and Evaluation of M-EPDG for Performance Analysis of Polish Typical Flexible and Rigid Pavements. *Road and Bridges - Drogi i Mosty*, **18**, 4, 2019, 283-302, DOI: 10.7409/rabdim.019.019
- [30] *Mazurek G., Iwanski M.*: Analysis of selected properties of asphalt concrete with synthetic wax. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, **66**, 2, 2018, 217-228. DOI: 10.24425/122102
- [31] *Abbas A., Masad E., Papagiannakis T., Shenoy A.*: Modeling asphalt mastic stiffness using discrete element analysis and micromechanics-based models. *International Journal of Pavement Engineering*, **6**, 2, 2005, 137-146. DOI: 10.1080/10298430500159040
- [32] *Park S.W., Kim Y.R., Schapery R.A.*: A viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete. *Mechanics of Materials*, **24**, 4, 1996, 241-255. DOI: 10.1016/S0167-6636(96)00042-7
- [33] *Kim Y.R., Little D.N.*: Chemical and mechanical evaluation on healing mechanism of asphalt concrete. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **59**, 1990, 240-275
- [34] *Schapery R.A.*: On viscoelastic deformation and failure behavior of composite materials with distributed flaws. *Advances in Aerospace Structures and Materials*, **AD-01**, 1981, 5-20
- [35] *Schapery R.A.*: Analysis of damage growth in particulate composites using a work potential. *Composites Engineering*, **1**, 3, 1991, 167-182. DOI: 10.1016/0961-9526(91)90017-M
- [36] *Kim Y.T.*: Fatigue characterization of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage theory. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **66**, 1997, 520-569
- [37] *Lee H.J.*: Viscoelastic Constitutive Modeling of Asphalt Concrete Using Viscoelasticity and Continuum Damage Theory. Ph.D. Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA, 1996
- [38] *Schapery R.A.*: A micromechanical model for non-linear viscoelastic behavior of particle-reinforced rubber with distributed damage. *Engineering Fracture Mechanics*, **25**, 5-6, 1986, 845-867. DOI: 10.1016/0013-7944(86)90046-9
- [39] *Park S.W.*: Development of a Nonlinear Thermo-Viscoelastic Constitutive Equation for Particulate Composites with Growing Damage. PhD Dissertation, The University of Texas, Austin, TX, 1994.
- [40] *Lee H.J., Kim Y.R.*: Viscoelastic Continuum Damage Model of Asphalt Concrete with Healing. *Journal of Engineering Mechanics*, **124**, 11, 1998, 1224-1232. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:11(1224)
- [41] *Daniel J.S.*: Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic, Continuum Damage Model and its Implementation to WesTrack Mixtures. PhD Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, NC; 2001
- [42] *Kutay M.E., Lanotte M.*: Viscoelastic continuum damage (VECD) models for cracking problems in asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering [Internet]*, **19**, 3, 2017, 231-242. DOI: 10.1080/10298436.2017.1279492
- [43] *Underwood B.S., Kim Y.R., Guddati M.N.*: Improved calculation method of damage parameter in viscoelastic continuum damage model. *International Journal of Pavement Engineering*, **11**, 6, 2010, 459-476. DOI: 10.1080/10298430903398088
- [44] *Gordon G.V., Shaw M.T.*: Computer programs for rheologists. Hanser Pub Inc; Munich, 1994. 324p
- [45] *Di Benedetto H., Sauzeat C., Bilodeau K., Buannic M., Mangiafico S., Nguyen Q.T., et al.*: General overview of the time-temperature superposition principle validity for materials containing bituminous binder. *International Journal of Roads and Airports*, **1**, 1, 2011. DOI: 10.5568/ijra.2011-01-03.3552
- [46] *Monismith C., Alexander R.L., Secor K.E.*: Rheological Behavior of Asphalt Concrete. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, **35**, 1966, 400-450
- [47] AASHTO T 378 Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017
- [48] *Chehab G.R., Kim Y.R., Schapery R.A., Witczak M.W., Bonaquist R.*: Time-temperature superposition principle for asphalt concrete with growing damage in tension state. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **71**, 2002, 559-593
- [49] *Underwood B.S., Kim Y.R., Guddati M., Pellinen T., Rongzong W., King G., et al.*: Characterization and performance prediction of ALF mixtures using a viscoelastoplastic continuum damage model. In: *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, **75**. 2006, 577-636
- [50] *Daniel J.S., Kim Y.R., Brown S., Rowe G., Chehab G., Reinke G.*: Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic, continuum damage model. In: *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, **71**, 2002, 619-650
- [51] *Kim Y.R.*: Modeling of Asphalt Concrete. McGraw-Hill Education, New York; 2009, 460p.

- [52] *Underwood B.S.*: Multiscale Constitutive Modeling of Asphalt Concrete, PhD Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2011.
- [53] *Lee H.J., Kim Y.R.*: Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading. *Journal of Engineering Mechanics*, **124**, 1, 1998, 32-40, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:1(32)
- [54] *Lee S.*: Investigation of the Effects of Lime on the Performance of HMA using Advanced Testing and Modeling Techniques. PhD Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA, 1997
- [55] *Reese R.*: Properties of Aged Asphalt Binder Related to Asphalt Concrete Fatigue Life. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **66**, 1997, 604-632
- [56] AASHTO TP 107 Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2018
- [57] *Hou T., Underwood B.S., Kim Y.R.*: Fatigue performance prediction of North Carolina mixtures using the simplified viscoelastic continuum damage model. In: *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists - Proceedings of the Technical Sessions*, **79**, 2010, 35-73
- [58] *Wang Y., Kim R.*: Development of a pseudo strain energy-based fatigue failure criterion for asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, **20**, 10, 2017, 1182-1192, DOI: 10.1080/10298436.2017.1394100
- [59] *Sabouri M., Kim Y.R.*: Development of a Failure Criterion for Asphalt Mixtures under Different Modes of Fatigue Loading. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2447**, 1, 2014, 117-125. DOI: 10.3141/2447-13
- [60] *Zhang J., Sabouri M., Guddati M.N., Kim Y.R.*: Development of a failure criterion for asphalt mixtures under fatigue loading. *Road Materials and Pavement Design*, **14**, sup2, 2013, 1-15, DOI: 10.1080/14680629.2013.812843
- [61] AASHTO PP 60 Preparation of Cylindrical Performance Test Specimens Using the Superpave Gyrotory Compactor (SGC). American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014
- [62] *Jaczeński M., Mejlun Ł.*: Wyznaczanie parametrów lepkosprężystego modelu Burgersa mieszanek mineralno-asfaltowych na podstawie badania pod obciążeniem dynamicznym. *Drognictwo*, **63**, 11, 2013, 344-348