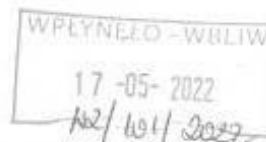


Praca doktorska

„Trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem zmęczenia i regeneracji”

Autor: **mgr inż. Eryk Mączka**



Streszczenie

W pracy badano wpływ zjawiska regeneracji oraz oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa, kumulacja – woda i mróz + sól drogowa) na trwałość zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych charakteryzujących się różnym rodzajem asfaltu, jego zawartością oraz technologią produkcji. Rozważania wzbogacono o tematykę trwałości zamodelowanych konstrukcji podatnych typu B z wykorzystaniem kryterium zmęczeniowego uwzględniając regenerację, oddziaływania środowiskowe oraz rodzaj asfaltu. Analizy przeprowadzono na podstawie autorskiej metodyki badawczej opracowanej m.in. na podstawie wykonanych eksperymentów związanych z: pomiarami temperatury konstrukcji oraz „pielęgnacją” mieszanek aproksymującą oddziaływanie czynników środowiskowych. Rezultaty badań wykorzystano do opracowania autorskiej metody uwzględniania omawianych czynników i jakościowej oceny zbadanych materiałów oraz zamodelowanych konstrukcji. Ponadto zaproponowano odpowiednie rozwiązania optymalizacyjne w zakresie składu mieszanki i grubości warstw konstrukcji.

W prezentowanej rozprawie przedstawiono przegląd literatury krajowej i zagranicznej dotyczący zagadnień związanych z trwałością zmęczeniową mieszanek i konstrukcji nawierzchni (kryteria zmęczeniowe), zjawiskiem regeneracji oraz oddziaływaniem czynników środowiskowych – woda i mróz, sól drogowa. Wykazano istotny problem braku skutecznych metod oceny mieszanek i konstrukcji z nich wykonanych na bazie asfaltów w szczególności modyfikowanych oraz wysokomodyfikowanych zawierających polimer SBS. Ponadto poruszono temat mieszanek wykonywanych w różnych technologiach produkcji. Nie znaleziono opracowań związanych z analizami w zakresie trwałości oraz regeneracji mieszanek wykonywanych na ciepło (WMA) i na gorąco (HMA). Podkreślono, iż do tej pory naukowcy skupiali się przeważnie na analizach porównawczych stosowania różnych dodatków i ich wpływu na podstawowe cechy jakościowe – wolna przestrzeń, ITSR, trwałość zmęczeniowa, odporność na deformacje trwałe. w przeglądzie poświęcono szczególną uwagę tematowi badań związanych z regeneracją. Przeanalizowano sposoby testowania, aplikowane warunki badawcze w laboratorium oraz temperatury panujące w nawierzchni. Dotychczas uwagę skupiano na mieszankach przeznaczonych do górnych warstw konstrukcji, wdrażając regenerację przez okres odpoczynku lub podgrzanie. Niższe temperatury 50 – 60°C, które mogą wystąpić w dolnych warstwach (podbudowa) podatnych konstrukcji nawierzchni również nie zostały analizowane w laboratorium. Ponadto wyszczególniono trend badawczy związany z testowaniem wpływu stosowania różnych dodatków - np. mikrokapsuł olejowych, zbrojenia rozproszonego (regeneracja indukcyjna). Wykazano brak skutecznych rozwiązań oceny i uwzględnienia regeneracji w trwałości zmęczeniowej mieszanek oraz w kryteriach zmęczeniowych stosowanych do projektowania nawierzchni. w ramach analiz zagadnienia trwałości zmęczeniowej MMA dokonano również przeglądu literatury w zakresie oddziaływania wody i mrozu oraz soli drogowej. Nie wyszczególniono do tej pory badań powiązanych z trwałością zmęczeniową obydwu tych czynników z użyciem metody czteropunktowego zginania, która dobrze aproksymuje warunki in-situ. Nie znaleziono również opracowań uwzględniających ten wpływ zarówno w mieszankach (laboratorium) oraz konstrukcji (kryterium zmęczeniowe). Temat należy do nowych.

Na podstawie dokonanego przeglądu stanu wiedzy oraz wykonanych badań, analiz i opracowanych autorskich metod udowodniono w rozprawie następującą tezę:

Uwzględnienie procesów regeneracji (healingu) oraz oddziaływania wody i mrozu i soli drogowej pozwala lepiej prognozować zjawiska zmęczeniowe zachodzące w mieszankach mineralno-asfaltowych oraz w nawierzchniach drogowych.

Prace doświadczalne w ramach realizacji niniejszej rozprawy obejmowały m.in. badania zmęczeniowe mieszanek typu beton asfaltowy (AC 22P) przeznaczonych na podbudowę, ruch KR 5-7 na bazie asfaltu: zwykłego 35/50 (na gorąco), 35/50 WMA (na ciepło), modyfikowanego 25/55-60 (na gorąco), wysokomodyfikowanego 25/55-80 HIMA (na gorąco) na trzech poziomach zawartości lepiszcza (element optymalizacji składu). Testy zrealizowano wykorzystując schemat belki czteropunktowo zginanej. Do badań zastosowano próbki pryzmatyczne, każdostronnie oszlifowane. Ponadto wdrożono regenerację mieszanek stosując podgrzanie temperaturowe w zautomatyzowanej komorze termicznej. Wyselekcjonowane próbki poddano również pielęgnacji w warunkach oddziaływania wody i mrozu oraz roztworu soli drogowej. Wdrożone zabiegi umożliwiły ocenę degradacji mieszanek wywołaną czynnikami środowiskowymi wyrażoną przez spadek trwałości zmęczeniowej oraz regenerację – przyrost.

Badania laboratoryjne podzielono na cztery główne części.

1. Podstawowe – związane z zaprojektowaniem recept i sprawdzeniem ich poprawności w odniesieniu do bieżących regulacji (podstawowe badania MMA).
2. Zaawansowane – związane z powszechną oceną trwałości mieszanek (tylko czynnik mechaniczny) oraz uwzględniając uprzednią pielęgnację w zróżnicowanych warunkach środowiskowych. Na ich podstawie ustalono m.in. degradację mieszanek (spadek trwałości zmęczeniowej).
3. Pomiary eksperymentalne temperatury konstrukcji – umożliwiające opracowanie warunków wdrażania regeneracji w laboratorium.
4. Zaawansowane – związane z ustalonym i wdrożonym programem wymuszania zjawiska regeneracji w badaniach laboratoryjnych – ocena zdolności regeneracji badanych mieszanek również z analizą jej ograniczenia w materiale przez oddziaływania środowiskowe.

Rezultaty umożliwiły opracowanie metod i formuł pozwalających uwzględnić regenerację oraz oddziaływania środowiskowe w trwałości zmęczeniowej MMA np. ze względu na skład. Pozwoliły one również prognozować zmiany trwałości wywołane odpowiednimi czynnikami i ocenić je względem mieszanek zawierających różne rodzaje asfaltu i wykonanych w odmiennych technologiach. Wykazano, iż regeneracja oraz oddziaływania środowiskowe istotnie wpływają na trwałość zmęczeniową. Ustalono, iż efekt wypadkowy jest zależny od wielu czynników – np. rodzaju lepiszcza w MMA, jego ilości, omawianego oddziaływania lub ich kombinacji. Do istotnych osiągnięć autora należy również opracowanie formuł, pozwalających wyznaczenie wpływu: degradacji, regeneracji, wypadkowego oraz trwałości zmęczeniowej stanu skumulowanego (woda i mróz + sól drogowa + regeneracja) bez konieczności wykonywania długoterminowych badań. Zależności są skuteczne niezależnie od rodzaju zaaplikowanego do mieszanki lepiszcza lub jego ilości. w ramach analiz wykazano m.in, iż mieszanki na bazie asfaltów zwykłych (w technologii na ciepło) zaistniały proces degradacji znacząco ograniczył zdolność regeneracji MMA przewyższając wpływ regeneracji. Na podstawie badań zaproponowano również uproszczoną

metodę skracania okresu projektowego podatnych konstrukcji katalogowych (typ B) ze względu na złożone warunki środowiskowe.

Ponadto w ramach dokonanych analiz opracowano nowe kryterium zmęczeniowe znajdujące zastosowanie w badaniach „healingowych” pozwalające zidentyfikować punkt zniszczenia. Wskazano również właściwy sposób wdrażania regeneracji. Stwierdzono również, iż zmiany strukturalne w mieszankach można z powodzeniem śledzić wykorzystując wykres zmian modułu sztywności od liczby cykli – w szczególności dla omawianych oddziaływań.

Na podstawie części eksperymentalnej, rozprawę wzbogacono modelowaniem konstrukcji z zastosowaniem programu Abaqus (MES) i kryterium zmęczeniowego AASHTO 2004. Zaproponowano modyfikację wybranego kryterium wzbogacając je o autorski współczynnik kalibracyjny uwzględniający rodzaj zastosowanego asfaltu oraz w sposób niezależny oddziaływania środowiskowe i regenerację. Wykazano, iż uwzględnienie wszystkich zmiennych pozwala skutecznie ocenić trwałość konstrukcji ze względu na rodzaj asfaltu stosowanego do mieszanki przeznaczonych na podbudowę i zróżnicowane warunki środowiskowe (w tym regenerację). Udowodniono, iż wpływ tych zmiennych należy do istotnych. Ponadto wskazano, iż możliwa jest optymalizacja grubości warstw konstrukcji, w szczególności tych wykonanych na bazie mieszank z asfaltów modyfikowanych i wysokomodyfikowanych. w pracy opracowano i przedstawiono kompleksową tabelę zmian trwałości katalogowych konstrukcji podatnych (KR 1-7, typ B) od omawianych czynników. Oceniono je względem mieszank charakteryzujących się różnym lepiszczem wykorzystując wcześniejsze rezultaty badawcze. Udowodniono, iż konstrukcje na bazie asfaltów zwykłych (na ciepło i na gorąco) w zależności od zawartości lepiszcza w MMA i wolnej przestrzeni w trudnych warunkach środowiskowo-ruchowych (KR 5-7, kumulacja – woda i mróz + sól drogowa + regeneracja) charakteryzują się nawet do 2 KR niższą trwałością niż wymagana dla danego zakresu KR. w przypadku modyfikowanych i wysokomodyfikowanych nawet do 2 KR wyższą. Wykazano również, które konstrukcje dla przyjętych kombinacji parametrów objętościowych powinny zostać pogrubione, a które mogą być odchudzone i w jaki sposób (wykorzystanie gotowych konstrukcji katalogowych przypadających na KR wyższą/niższą).

Przeprowadzone badania, analizy, modelowanie, opracowane metody i formuły umożliwiły skutecznie uwzględnić regenerację, oddziaływania środowiskowe (w tym skumulowane), w trwałości MMA i dodatkowo rodzaj lepiszcza konstrukcji nawierzchni. Warto podkreślić, iż do tej pory to nie zostało uczynione. Wykonane działania są istotnym wkładem w naukę.

17.05.2022

Eugen Kędan

Summary

The study investigated the effect of the regeneration phenomenon and environmental impacts (water and frost, road salt, accumulation - water and frost + road salt) on the fatigue life of asphalt mixtures characterized by different types of asphalt, its content, and production technology. The considerations were enriched with the topic of the durability of modeled B-type flexible structures with the use of the fatigue criterion, taking into account regeneration, environmental impact, and the type of asphalt. The analyzes were carried out on the basis of the original research methodology developed, among others, on the basis of performed experiments related to the measurement of the constructure temperature and care of mixtures approximating the influence of environmental factors. The results of the research were used to develop the proprietary method of taking into account the discussed factors and the qualitative assessment of the tested materials and modeled structures. Moreover, appropriate optimization solutions were proposed in terms of the composition of the mixture and the thickness of the construction layers.

The presented dissertation presents a review of domestic and foreign literature on issues related to the fatigue life of mixtures and pavement structures (fatigue criteria), the phenomenon of regeneration, and the impact of environmental factors - water and frost, road salt. A significant problem of the lack of effective methods of assessing mixtures and structures made based on the different types of asphalt, in particular, modified and highly modified asphalts containing SBS polymer has been demonstrated. In addition, the topic of mixtures made in various production technologies was discussed. No studies related to the analysis of durability and regeneration of hot mixes (WMA) and hot mixes (HMA) were found. It was emphasized that so far scientists have focused mainly on comparative analyzes of the use of various additives and their impact on the basic quality characteristics - free space, ITRR, fatigue life, and resistance to permanent deformation. the topic of research related to regeneration was given particular attention in the review. The methods of testing, the applied test conditions in the laboratory, and the temperatures in the pavement were analyzed. So far, the focus has been on mixtures for the upper layers of the structure, implementing regeneration through a period of rest or/and heating. The lower temperatures of 50-60 °C that may occur in the lower layers (sub-base) of the flexible pavement structures were also not analyzed in the laboratory. In addition, the research trend related to testing the impact of using various additives - e.g. oil microcapsules, and dispersed reinforcement (induction regeneration) was specified. The lack of effective solutions for the assessment and consideration of regeneration in the fatigue life of mixtures and in the fatigue criteria used in the pavement design was demonstrated. As part of the analysis of the MMA fatigue life issue, a review of the literature was also carried out in the field of the impact of water and frost. Road salt impact was also considered in the review. So far, the studies related to the fatigue life of both factors using the four-point bending method, which closely approximates the in-situ conditions, have not been studied. There were also no studies that would take into account this influence both in the mixtures (laboratory) and in the structure (fatigue criterion). The subject is new.

Based on the review of the state of knowledge as well as the research, analysis, and developed original methods, the following thesis was proved in the dissertation:

Considering the regeneration (healing) processes and the impact of water, frost, and road salt allows for better forecasting of fatigue phenomena occurring in asphalt mixtures and road pavements.

Experimental work as part of the implementation of this dissertation included, inter alia, fatigue tests of asphalt concrete mixes (AC 22P) mainly intended for the foundation, KR 5-7 traffic based on asphalt: ordinary 35/50 (hot), 35/50 WMA (warm), modified 25 / 55-60 (hot), highly modified 25 / 55-80 HIMA (hot) at three levels of binder content (a component of composition optimization). The tests were carried out using the four-point bending beam scheme. Prismatic samples polished on each side, were used for the tests. In addition, the regeneration of the mixtures was implemented using temperature heating in an automated thermal chamber. Selected samples were also cured under the influence of water, frost, and road salt solution. The implemented treatments made it possible to evaluate the degradation of mixtures caused by environmental factors, expressed by the decrease in fatigue life and regeneration - increase.

Laboratory tests are divided into four main parts.

1. Basic - connected with designing prescriptions and checking their correctness in relation to current regulations (basic MMA research).
2. Advanced - related to the general assessment of the durability of mixtures (only the mechanical factor) and taking into account the previous care in various environmental conditions. On their basis, it was established, inter alia, degradation of mixtures (decrease in fatigue life).
3. Experimental measurements of the temperature of the structure - enabling the development of conditions for the implementation of regeneration in the laboratory.
4. Advanced - related to the established and implemented a program of forcing the phenomenon of regeneration in laboratory tests - evaluation of the regeneration capacity of the tested mixtures, also with the analysis of its limitations in the material by environmental influences.

The results made it possible to develop methods and formulas to take into account the regeneration and environmental impacts in the fatigue life of MMA, e.g. due to the composition. They also made it possible to forecast changes in durability caused by appropriate factors and to evaluate them in relation to mixtures containing different types of asphalt and made with different technologies. It has been shown that regeneration and environmental impacts significantly affect fatigue life. It was found that the resultant effect depends on many factors - e.g. the type of binder in MMA, its amount, the discussed effect, or their combination. The author's significant achievements also include the development of formulas that allow determining the impact of degradation, regeneration, accident, and fatigue durability of the cumulative state (water and frost + road salt + regeneration) without the need to perform long-term tests. The dependencies are effective regardless of the type of binder applied to the mixture or its amount. The analysis showed, inter alia, that in mixtures based on ordinary asphalts (in warm mixes), the degradation process significantly limited the regeneration capacity of MMA, exceeding the effect of regeneration. Based on the research, a simplified method of shortening the design period of susceptible catalog structures (type B) due to complex environmental conditions has also been proposed.

In addition, as part of the analysis, a new fatigue criterion was developed to be used in healing studies to identify the point of destruction. The correct way to implement regeneration was also indicated. It was also found that the structural changes in the mixtures can be successfully monitored using the graph of changes in the stiffness modulus versus the number of cycles - in particular for the discussed interactions.

Based on the experimental part, the dissertation was enriched with the modeling of the structure using the Abaqus program (FEM) and the AASHTO 2004 fatigue criterion. It was proposed to modify the selected criterion by enriching it with an original calibration factor taking into account the type of asphalt used, as well as independent environmental impact and regeneration. It has been shown that taking into account all the variables allow to effectively assess the durability of the structure in terms of the type of asphalt used for the mixture intended for the foundation and different environmental conditions (including regeneration). It has been proven that the influence of these variables is significant. In addition, it was indicated that it is possible to optimize the thickness of the structure layers, in particular those made on the basis of mixtures of modified and highly modified asphalts. The work presents a comprehensive table of changes in the durability of catalog flexible structures (KR 1-7, type B) due to the factors discussed. They were assessed in relation to mixtures characterized by a different binder, using the previous research results. It has been proven that structures based on ordinary asphalts (warm and hot), depending on the binder content in MMA and free space in difficult environmental and traffic conditions (KR 5-7, accumulation - water and frost + road salt + regeneration), are characterized by even up to 2 KR lower service life than required for a given KR range, in the case of modified and highly modified even up to 2 KR higher. It was also shown which constructions for the assumed combinations of volumetric parameters should be bold, which can be slimmed down, and in what way (use of ready-made catalog constructions for a higher / lower KR).

The conducted research, analyses, modeling, and the developed methods and formulas made it possible to effectively take into account regeneration, environmental impacts (including cumulative ones), durability of MMA, and, additionally, the type of pavement structure binder. It is worth noting that this has not been done so far. The activities performed are an important contribution to the actual stance of knowledge.

17.05.2022

Eryk Mąka