

# Procesy regeneracji mieszanek mineralno-asfaltowych

## Healing process in mineral asphalt mixes



**Eryk Mączka**

Mgr inż.

Politechnika Wrocławska,  
Wydział Budownictwa Lądowego  
i Wodnego

eryk.maczka@pwr.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono zagadnienie związane z zjawiskiem regeneracji zachodzącym w mieszankach mineralno-asfaltowych. We wstępie pracy omówiono problem obniżania się wytrzymałości oraz trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych wyrażony przez zmianę modułu sztywności. Zwrócono uwagę na złożoność tego zjawiska, które związane jest ze zmianami mikrostrukturalnymi. W przeglądzie stanu wiedzy omówiono zjawisko zwane „healingiem” odnoszące się bezpośrednio do regeneracji mieszanek mineralno-asfaltowych. W dalszej części na podstawie badań zmęczeniowych belki czteropunktowo zginanej w trybie kontrolowanego odkształcenia przeprowadzono analizę tego zjawiska. Uwzględniono okresy odpoczynku pomiędzy obciążeniem oraz podgrzanie próbek regenerujące badaną mieszankę. Na podstawie analizy wyników nadań stwierdzono, że proces podgrzania jest bardziej efektywnym czynnikiem prowadzącym do większego zysku regeneracyjnego nie tylko sztywności próbki, ale również jej żywotności wyrażonej w cyklach w porównaniu do okresu odpoczynku. Pod koniec pracy pokazano zmiany histerezy pozwalające analizować zmiany energetyczne oraz istotę procesów regeneracyjnych w kontekście wydłużania żywotności mieszanek stosowanych w warstwach konstrukcji nawierzchni.

**Słowa kluczowe:** Mieszanki mineralno-asfaltowe; Regeneracja; Energia; Zmiany strukturalne; Sztywność; Liczba cykli

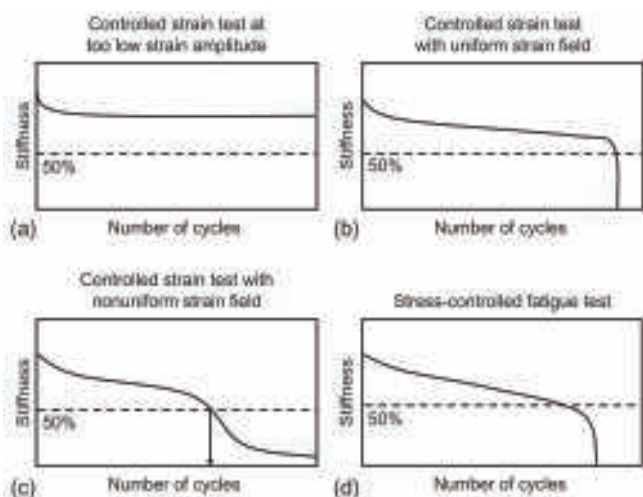
**Abstract:** The article presents an issue related to the phenomenon of regeneration occurring in mineral-asphalt mixtures. The introduction of the work discusses the problem of decreasing strength and fatigue life of asphalt mixtures expressed by changing the stiffness modulus. Attention is paid to the complexity of this phenomenon, which is associated with microstructural changes. The review of the state of knowledge discusses a phenomenon called "healing" referring directly to the regeneration of mineral-asphalt mixtures. Later on, based on fatigue tests of the four-point bending beam in the controlled deformation mode, this phenomenon was analyzed. Rest periods between load and heating of samples regenerating the tested mixture are taken into account. Based on the analysis of the test results, it was found that the heating process is a more effective factor leading to a greater regeneration gain not only the stiffness of the sample, but also its lifespan expressed in cycles compared to the rest period. At the end of the work, hysteresis changes were shown to analyze energy changes and the essence of regenerative processes in the context of extending the life of mineral asphalt mixes used in the pavement construction layers.

**Keywords:** Mineral asphalt mixes; Healing; Energy; Structural damage; Stiffness; Amount of repetitive loading

Nowobudowane drogi wysokich klas technicznych – autostrady i drogi ekspresowe, których warstwy np. ścieralna i wiążąca zbudowane są z mieszanek mineralno-asfaltowych (zwanymi dalej MMA) narażone są na wiele czynników zewnętrznych, które prowadzą do ich zniszczenia. Wśród nich znajdują się warunki środowiskowe takie jak: zmienność temperatury, wilgotności czy procesy starzeniowe wywołane m.in. działaniem promieni UV [2, 4, 6, 11]. Jednak bezpośrednim, istotnym czynnikiem decydującym o trwałości nawierzchni jest obciążenie od kół pojazdu. Na skutek obciążenia w warstwach nawierzchni powstaje złożony stan naprężenia wywołujący ściskanie, zginanie oraz ścinanie [12]. Obciążenie przekracza-

jące nośność nawierzchni powoduje natychmiastową szkodę np. w postaci spękań występujących bezpośrednio pod kołem pojazdu lub/i na dolnej części warstwy. Szczególnie jest to zauważalne w niskich temperaturach, przy których materiał wykazuje dużą sztywność, ale również kruchość. Skutkiem wystąpienia takiego uszkodzenia jest najczęściej zniszczenie materiału - brak jego zdolności do przenoszenia obciążeń. Zniszczenie nawierzchni może wystąpić także dla wymuszeń, które nie przekraczają wytrzymałości MMA. Występuje wtedy długotrwałe zmęczenie materiału. Miarą zmęczenia jest liczba cykli ustalonego wymuszenia, które materiał jest w stanie przenieść zanim ulegnie zniszczeniu. Ocenę trwałości

MMA, prowadzi się w badaniach zmęczeniowych zgodnie z [15]. Badanie normowe można przeprowadzić w próbie kontrolowanego odkształcenia lub naprężenia wprowadzając w układzie wahadłowym odpowiednie wymuszenie o charakterze sinusoidalnym, dla ustalonych warunków badania. Istnieje wiele rodzajów testów zmęczeniowych (np. ściskanie-rozciąganie, pośrednie rozciąganie, dwupunktowe zginanie), jednak najczęstszą stosowaną metodą jest zginanie czteropunktowe (4-BP) [1, 2, 4, 11] ze względu na dobre odwzorowanie warunków in-situ oraz równomierny rozkład naprężeń. Miarą trwałości w takich badaniach jest najczęściej liczba cykli, jaką jest w stanie przenieść pryzmatyczna próbka przy arbitralnie



1. Przypadki badania zmęczeniowego (kontrolowane naprężenie, odkształcenie)[4]

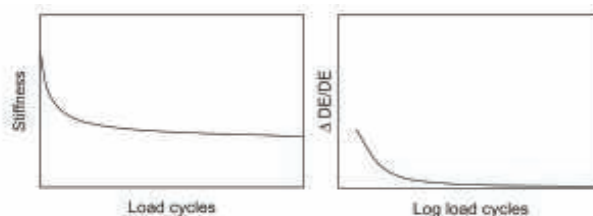
założonym kryterium jakim jest spadek modułu sztywności do wartości 50%. Skutkiem cyklicznego obciążenia w próbce jest kumulacja uszkodzeń powodująca zmiany strukturalne, a w dalszym etapie pękanie. Różne przypadki badania zmęczeniowego (kontrolowane naprężenie, odkształcenie) przedstawiono na rys. 1.

Powszechnie stosowana metodologia w badaniu zmęczeniowym nie jest wystarczająca do pełnej oceny zachodzących zjawisk w procesie zmęczenia, które związane jest z degradacją materiału na poziomie mikrostruktury. Podczas każdego cyklu obciążania dochodzi do zmian energetycznych w MMA. W trakcie dyssypacji energii zmieniają się właściwości materiału (np. zmniejsza się wartość modułu sztywności), Pokazuje to schemat wykonany przez Carpentera i.in. [4] (rys. 2.)

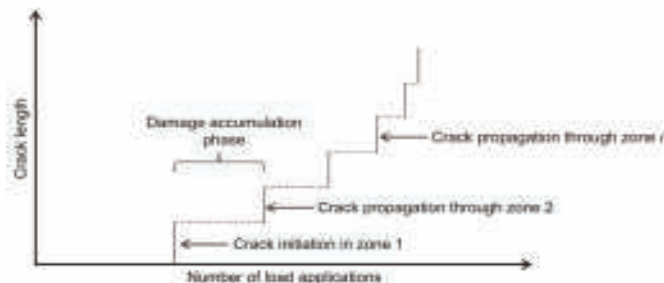
W wielu badaniach wykazano [1, 2, 4, 5, 7, 11, 14, 19, 20], iż energia jest rozpraszana na dwa sposoby. Pierwszym przypadku energia termiczna

uwalniająca jest poza układ w postaci ciepła, natomiast w drugim przypadku energia prowadzi do zmian strukturalnych w materiale. Ich efektem może być np. przemieszczanie się względem siebie składników MMA lub/i inicjacja oraz nukleacja mikropęknięć. Każda ze zmian strukturalnych w dalszym etapie prowadzi do powstania nowych mikropęknięć i propagacji istniejących [2, 4, 8, 11, 14]. W trakcie obciążenia mikropęknięcia przekształcają się w makropęknięcia powodujące w dalszym etapie całkowite zniszczenia. Schemat wykonany przez Roque'a i.in. [4] na rys. 3 ukazuje zasadę przyrostu długości pęknięcia przy ilościowym wzroście zaaplikowanego wymuszenia dla modelu HMA-FM stosowanego jako podstawowy opis mechanizmu pęknięcia dla MMA [13].

Warto zauważyć, iż proces pęknięcia prowadzący do zniszczenia postępuje nagle, nieprzewidywalnie – najczęściej schodkowo. Co związane jest ze zmianami energii. Huang i.in. [4] podjęli pró-



2. Spadek sztywności i energii dyssypowanej przy badaniach zmęczeniowych [4]

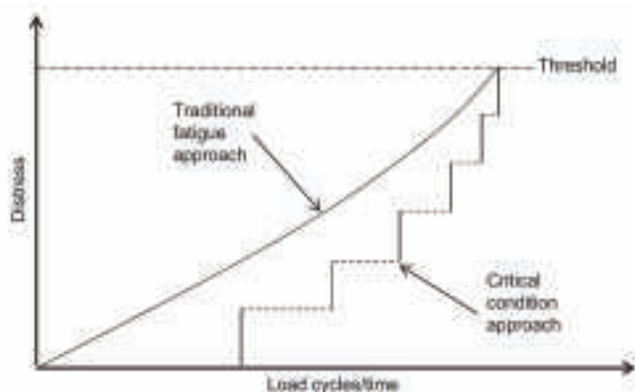


3. Kumulacja uszkodzeń i przyrost spękań dla modelu HMA-FM [4]

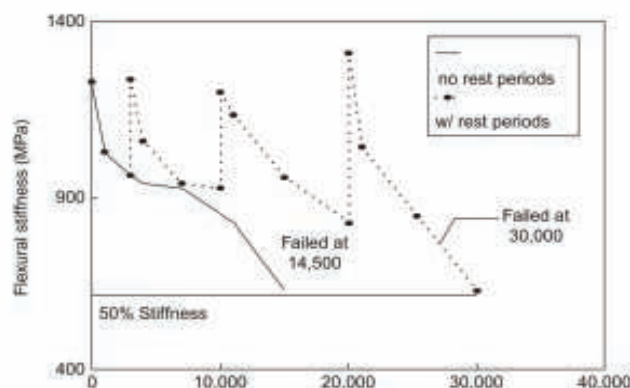
bę dokładniejszego opisu tego zjawiska – rys. 4.

W procesie zmęczeniowym moduł sztywności, kąt przesunięcia fazowego jest łatwy do zarejestrowania, natomiast inicjacja, kumulacja i propagacja pęknięć wymaga bardziej skomplikowanych obserwacji. Podczas badań w laboratorium może dojść do nagłego pęknięcia próbki pomimo niewykorzystanego zapasu nośności wynikającego z kryterium zmęczeniowego opartego na module sztywności. Jednoznaczna ocena trwałości MMA jest zatem skomplikowana i nie zawsze jednoznaczna. Problematykę zmęczenia dodatkowo komplikuje zmienność obciążenia w czasie oraz zmienność cech materiałowych, w momencie gdy nie działa obciążenie.

Już od 30 lat analizowane jest zjawisko regeneracji MMA. Proces regeneracji nazywany „healingiem” polega na odzyskiwaniu zdolności materiału do przenoszenia obciążeń. Wielu badaczy [4, 7, 10, 13, 16–18] zauważyło, że ini-



4. Różnica pomiędzy zwykłym zmęczeniem, a wystąpieniem spękań. [4]



5. Efekt wdrożenia okresów odpoczynku dla badanych próbek z betonu asfaltowego w 20 st. C [4]

cja „healingu” rozpoczyna się w momencie, gdy materiał nie jest obciążony. Dowiedziono, iż zastosowany odpowiedni czas odpoczynku oraz temperatura wpływają na regenerację MMA prowadząc do „odzyskiwania” sztywności, zwiększając liczbę cykli przenoszonych przez materiał. Zaobserwowano również, iż proces regeneracji występuje we wszystkich warstwach nawierzchni i jest zróżnicowany w zależności od ich lokalizacji w nawierzchni.

W pierwszych badaniach „healingu” analizowano zmiany samego lepiszcza asfaltowego. Dowiedziono, iż proces regeneracji zachodzi na poziomie wiązań pomiędzy atomami - siłami adhezji i kohezji oraz powierzchniami w otoczeniu pęknięcia [3, 9, 16]. Dopiero po kilkunastu latach zaczęto skupiać uwagę na MMA.

Przykład zależności zmiany liczby cykli od modułu sztywności w uwzględnieniu okresu odpoczynku przedstawiono na rys. 5.

W pracy [4] wykazano, że przy zastosowaniu odpowiednich czasów odpoczynku można uzyskać nawet dwukrotnie większą trwałość zmęczeniową w porównaniu do ciągłego procesu obciążenia.

Aktualnie zjawisko „healingu” wymaga ilościowego i jakościowego opisu zdolności regeneracji MMA. Badacze jak np. [3, 4, 7, 10] podejmują próby rozwiązania tego zagadnienia, jednak rezultaty obecnych prac nie są skuteczne. Stwierdzono, iż opisywany proces jest zależny m.in. od warunków temperaturowych, czasu trwania odpoczynków i ogrzewania, rodzaju materiału, poziomu i sposobu obciążenia.

Zjawisko „healingu” jest niezwykle ważne, ponieważ prowadzi do zwiększenia trwałości zmęczeniowej i „odzysku” sztywności - dwóch najważniejszych wielkości stosowanych w ocenie mikro i makroskopowej. Należy zaznaczyć, że w rzeczywistości nawierzchnia drogową ulega zmiennym w czasie (np. w ciągu doby, roku) zjawiskom obciążenia. Pojawiają się okresy „odpoczynku” i regeneracji wpływające na wydłużenie okresu eksploatacji projektowanej nawierzchni. Istotne jest to dla dróg wyższych klas poddanych dużym, zmiennym obciążeniom. W związku z opisaną

problematyką autor podjął wstępne próby analizy tego zjawiska przeprowadzając stosowne badania laboratoryjne.

## Metoda badawcza

Do oceny zjawiska „healingu” autor wykorzystał normowe badanie zmęczeniowe [15]. Eksperyment przeprowadzono w próbie kontrolowanego odkształcenia w teście 4BP. Do badania użyto pryzmatycznych próbek o wymiarach 38 cm x 6 cm x 5 cm wykonanych z mieszanki betonu asfaltowego o wysokim module sztywności (AC WMS 16). Przygotowano 12 belek wykonanych z jednego „zarobu” o zawartości asfaltu w mieszance na poziomie 5.2%. Badania przeprowadzono w temperaturze 5.0°C. Przed badaniem próbki kondycjonowano zgodnie z wymaganiami. W takich niskich temperaturach MMA wykazują quasi-sprężysty charakter pracy i są bardziej podatne na kruche pęknięcie. Należy zwrócić uwagę, że AC WMS charakteryzują się stosunkowo wysokim modulem sztywności, co wskazuje na zwiększoną podatność na pęknięcie. Częstotliwość obciążenia zastosowanego w badaniu wynosiła 15.0 Hz. Eksperyment przeprowadzono dla dwóch stałych poziomów wymuszenia o amplitudzie równej:  $\epsilon_1=300 \cdot 10^{-6}$  i  $\epsilon_2=150 \cdot 10^{-6}$ . Tak zróżnicowane obciążenia pozwoliły dokładniej śledzić proces regeneracji. Do wykonania oznaczeń przyjęto arbitralne kryterium zmęczeniowe spadku modułu o 50%, zgodnie z wymaganiami normowymi.

Badanie przeprowadzono dla trzech przypadków. Pierwszy przypadek polegał na dwukrotnym zmęczeniu próbki bez czasu odpoczynku i procesu ogrzewania (zwany dalej w pracy zmęczeniem #1-zmęczeniem #2). Drugi przypadek zakładał 12.0 h czasu odpoczynku w temperaturze eksperymentu (zmęczenie #1 - czas odpoczynku - zmęczenie #2). W trzecim zastosowano trzygodzinne ogrzanie beleczki MMA w suszarce, stosując temperaturę 80.0°C. Następnie przez 12.0 h próbka podlegała procesowi odpoczynku w temperaturze badania zanim została poddana kolejnemu zmęczeniu (zmęczenie #1 - podgrzanie - zmęczenie #2). Dla każdego poziomu obciążenia i analizowanego przypadku

wykonano oznaczenie dla dwóch próbek. Wyniki uśredniono i zaprezentowano w rezultatach badania. Do oceny regeneracji badanej mieszanki posłużono się zmiennością modułu sztywności i liczbą cykli. Rys. 6 przedstawia wybraną próbkę na stanowisku badawczym.

## Rezultaty badań

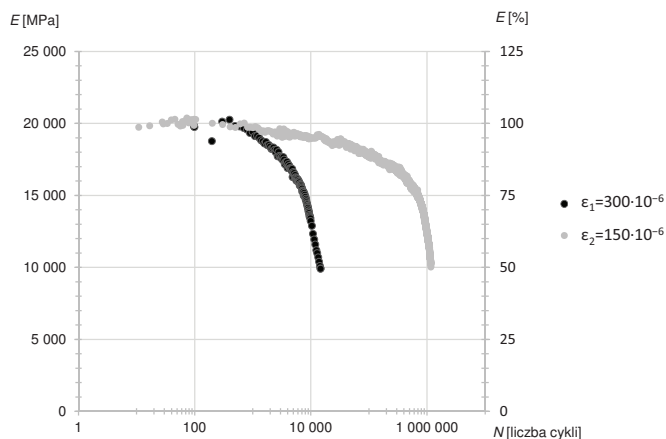
Podczas eksperymentu dla założonych warunków badania, pierwszym monitorowanym parametrem był moduł sztywności. Dla każdej oznaczonej próbki wynosił on około  $20\,000 \pm 1\,000$  MPa. Zasugerowano, iż różnice w module sztywności mogły zostać spowodowane ułożeniem kruszywa w mieszance oraz jej niejednorodnością typową dla technologii zagęszczania. Wyniki badania zmęczeniowego dla dwóch poziomów wymuszenia ( $\epsilon_1=300 \cdot 10^{-6}$  i  $\epsilon_2=150 \cdot 10^{-6}$ ) zmęczeniowego zamieszczono na rys. 7. Ze względu na znaczne różnice w trwałościach (różnica 100-krotna) wyniki badania w tym przypadku przedstawiono w skali logarytmicznej.

Zamieszczony rysunek 7 pokazuje zmienność modułu sztywności (od 100 cyklu oznaczającego sztywność początkową E0 do E50% wyrażającego przyjęte kryterium zmęczeniowe) od liczby cykli przy założonym poziomie obciążenia. Otrzymany wykres jest typowy dla próby kontrolowanego odkształcenia. Warto zwrócić uwagę na charakterystyczne zmiany wartości sztywności po około 100 cyklu. Drobne zaburzenie może wynikać z układania się próbki między zaciśniętymi szczękami w trakcie badania.

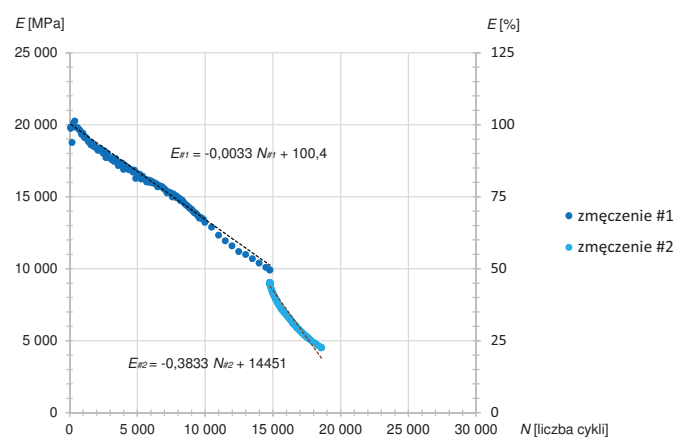
W dalszym etapie badań poddano analizie zmienność modułu sztywności przy natychmiastowym, powtórnym obciążeniu. Wykres uzyskany dla pierw-



6. Próbkę na stanowisku badawczym



7. Zmiana wartości modułu dla amplitudy wymuszenia 300 i 150 mikroadkształceń



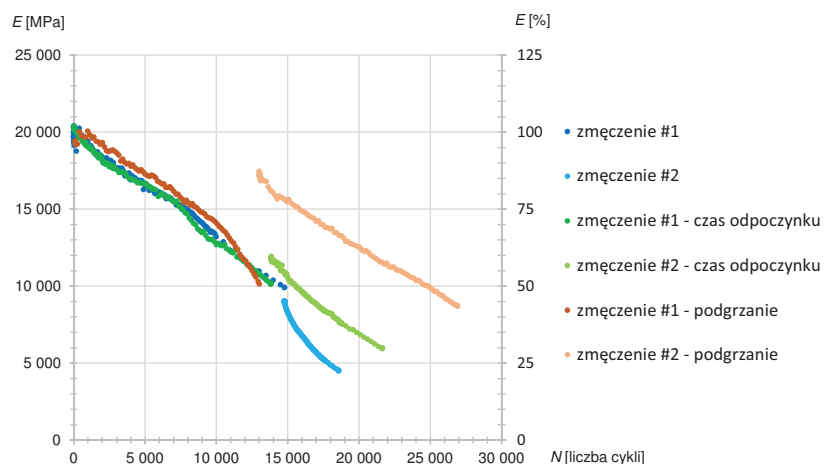
8. Zmienność modułu przy powtórzeniu badania zmęczenia dla poziomu obciążenia 300 mikroadkształceń

szego i drugiego przypadku (zmęczenie #1-zmęczenie #2) dla poziomu obciążenia 300 mikroadkształceń zamieszczono na rys. 8. Na wykresie widoczny jest spadek wartości modułu sztywności pomiędzy kolejnymi badaniami zmęczeniowymi. Zauważyć można, iż dla drugiego zmęczenia widać wyraźną zmianę kąta nachylenia aproksymującej funkcji liniowej. Prawdopodobnie zmiany te wynikają z wyczerpania trwałości zmęczeniowej materiału, który nie jest w stanie przenosić więcej obciążeń. Kluczową obserwacją w drugim zmęczeniu jest zmniejszenie liczby cykli przenoszonych przez materiał o ok. 70.0%. Formuluje się hipotezę, iż obserwowane zmiany na wykresie związane są ze zmianami strukturalnymi materiału, mimo iż jest to bardzo krótki czas odciążenia w trakcie badania zmęczeniowego.

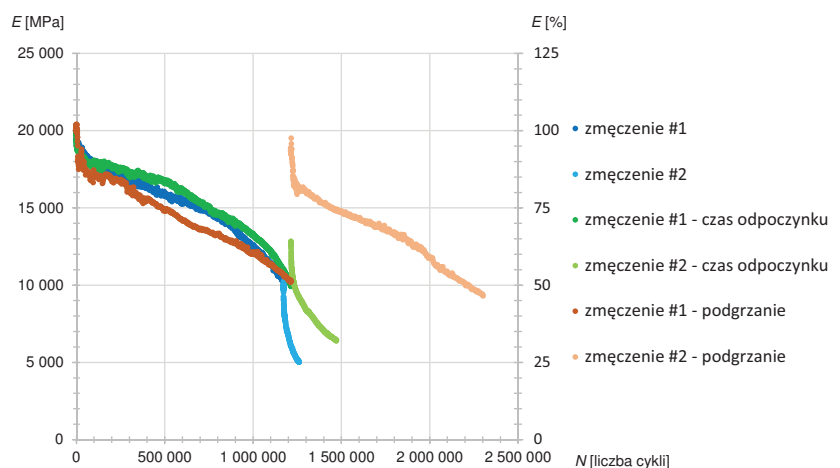
Zgodnie z opisanymi wcześniej założeniami przeprowadzono pozostałe kombinacje badań uwzględniając dłuższy okres odpoczynku oraz podgrzewanie materiału. Otrzymane rezultaty dla wszystkich trzech przypadków uwzględniających różne poziomy obciążenia zaprezentowano na rys. 9 i rys. 10. Obydwa wykresy wykazują ten sam poziom sztywności początkowej. Do istotnych zmian dochodzi podczas pierwszego etapu zmęczenia. Porównując oba rysunki widać wyraźną zmienność modułu sztywności wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia. Różnicowany jest kształt wykresów. Można zauważyć, iż zastosowany wyższy poziom obciążenia, kilkudziesięciokrotnie szybciej prowadzi do wyczerpania trwa-

łości w mieszanke. Dwukrotnie większe obciążenie spowodowało zmniejszenie 80-ciokrotne trwałości. Rozpatrując etap przejścia z jednego schematu badania do drugiego zauważyć można „skok” wartości modułu. Brak działań „healingowych” spowodował gwałtowny spadek sztywności. Natomiast zastosowane długie okresy odpoczynku spowodowały przyrost wartości modułu. Szczególnie widoczne jest to przy zastosowaniu podgrzania mate-

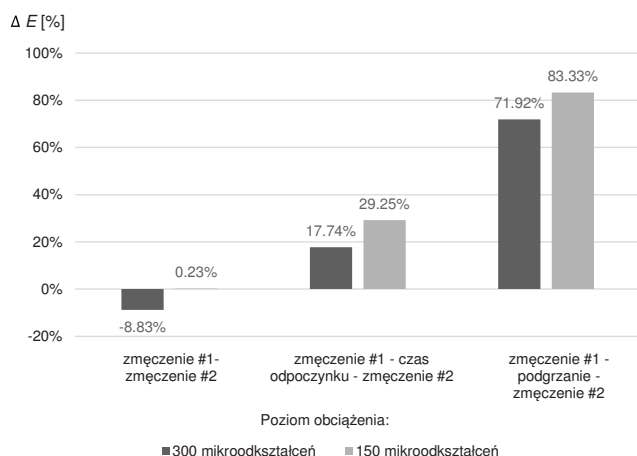
riału. Przy zastosowaniu tylko czasu odpoczynku moduł szybko maleje (w drugiej próbie zmęczenia). Kąt nachylenia aproksymującej funkcji liniowej jest większy. Ogrzanie doprowadziło badane próbki do praktycznie pełnej regeneracji. Wykres zmiany wartości modułu względem cykli obciążenia dla drugiej próby względem pierwszej jest bardzo podobny. Kąty pochylenia krzywych na wykresie są prawie identyczne. Może to sugerować, iż na poziomie



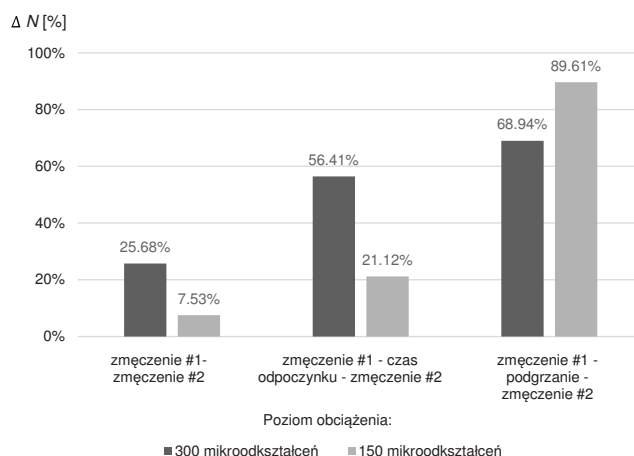
9. Zmienność modułu sztywności i liczby cykli dla wszystkich przypadków badania - obc. 300 mikroadkształceń



10. Zmienność modułu sztywności i liczby cykli dla wszystkich przypadków badania - obc. 150 mikroadkształceń



11. Procentowa zmienność modułu sztywności dla wszystkich przypadków badania



12. Procentowa zależność zmienności liczby cykli dla wszystkich przypadków badania

strukturalnym doszło do przywrócenia „stanu pierwotnego” MMA. Na rys. 11 przedstawiono procentowe analizy zmienności wartości modułu pomiędzy badanymi przypadkami dla obydwu poziomów obciążeń.

Rysunek potwierdza wcześniejsze obserwacje. Poziom regeneracji modułu mieszanki jest największy dla przypadku ogrzania próbki do 80.0°C. Zastosowany okres odpoczynku (12.0 h) ma stosunkowo niewielki wpływ na zmianę wartości modułu. Wartość ujemna na schemacie oznacza, iż nie było przyrostu modułu sztywności tylko jego spadek.

Procentową zmienność liczby cykli podczas wtórnego badania do pierwotnego zamieszczono na rys. 12.

Przedstawiony wykres również potwierdza wcześniejsze obserwacje. Można stwierdzić, że dla mniejszych poziomów obciążeń dochodzi do mniejszych zmian strukturalnych w materiale – np. mikropęknięć, które MMA jest w stanie zregenerować. Natomiast dla wyższych poziomów obciążenia ( $\epsilon_1=300 \cdot 10^{-6}$ ), MMA nie jest w stanie odtworzyć pełnej trwałości

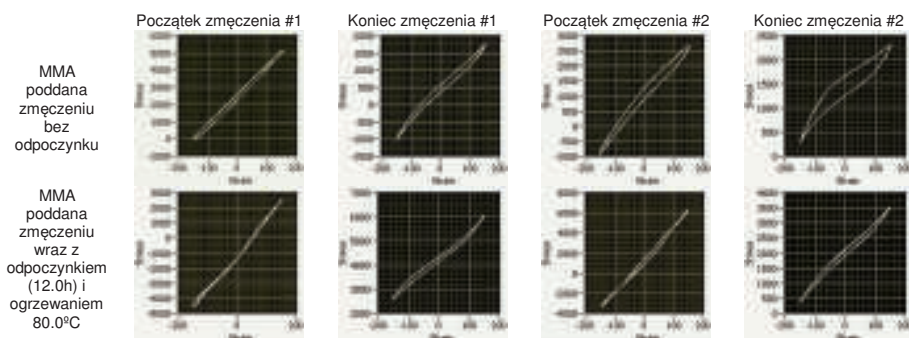
zmęceniowej ze względu na nieodwracalne uszkodzenia skumulowane w materiale. Sytuacja, która pojawia się dla czasu odpoczynku i obciążenia na poziomie 300 mikroodkształceń, może wynikać z wielkości przykadanego obciążenia i stopnia kumulacji uszkodzeń wewnątrz materiału. Proces rozwoju mikropęknięć jest intensywny i powoduje nieodwracalne uszkodzenia, które w większym stopniu jest wstanie zregenerować okres odpoczynku z zastawianiem wysokiej temperatury.

Ostatnim punktem prowadzonych obserwacji była analiza zmienności histerezy zmęczeniowych. Wprowadzono 4 punkty kontrolne w trakcie badania. Z uwagi, iż kształty histerezy były podobne dla pierwszego i drugiego przypadku badania, wykresy pokazano dla jednego przypadku. Różnica w geometrii histerezy pomiędzy poziomami wymuszenia stosowanymi w badaniu jest niewielka – zmienne jest tylko pole obszaru. Kształt pozostaje analogiczny. Skorzystano zatem z wykresów dla poziomu obciążenia. Zestawienie otrzymanych rezultatów zaprezentowano na rys. 13. Z oceny wizualnej zarówno

dla przypadku zmęczenia bez okresu odpoczynku histereza przekształca się z prawie liniowej formy na elipsoidalną. Świadczy to o nieodwracalnych zmianach energetycznych wewnątrz materiału. Szczególnie widoczne jest to przy drugiej próbie zmęczenia. Energia dysypowana jest w większości w postaci ciepła, jednakże duża jej ilość może przekształcić się na inicjację i propagację mikropęknięć. Materiał ulega degradacji, a jego moduł szybko zmniejsza swoją wartość. W przypadku histerezy dla próbki podanej ogrzaniu, zauważyć można, iż po dostarczeniu ciepła (energii) do układu, która wcześniej była rozpraszana, histereza zaczyna wracać do pierwotnego kształtu. Wysuwa się hipotezę, iż dostarczanie energii termicznej do układu jest przyczyną przyspieszonej regeneracji MMA, która „usuwa” powstałe uszkodzenia np. dostatecznie małe mikropęknięcia powodując korzystne zmiany w strukturze materiału.

## Podsumowanie

W artykule wprowadzono zagadnienie regeneracji MMA. Wykazano złożoność badanej problematyki i eksperymentalnie podjęto próbę oceny ilościowej i jakościowej zmian właściwości „healingowych” MMA. Zaprezentowano skuteczną metodę badawczą 4-BP oraz odpowiednie poziomy wymuszenia (amplituda o wysokości 300 i 150 mikroodkształceń) pozwalające wykazać możliwości regeneracyjne MMA. Mimo, iż zastosowano klasyczne kryterium zmęczeniowe wyrażane przez spadek wartości modułu o 50%, możliwe było



13. Zmienność histerezy w czterech etapach badania dla różnych przypadków regenerujących

wykazanie skuteczności zastosowanego okresu odpoczynku i ogrzewania materiału. W pracy przeanalizowano trzy przypadki badania, które wskazały jednoznacznie możliwości regeneracji MMA: pierwszy - dwukrotne zmęczenie próbki bez okresu odpoczynku, drugi – dwukrotne zmęczenie próbki z wprowadzeniem 12.0h okresu odpoczynku i trzeci – dwukrotne zmęczenie próbki z zastosowaniem podgrzania w temperaturze 80°C w czasie 3 godzin oraz z zastosowaniem kondycjonowania 12.0h. Na podstawie obserwacji histerezy zmęczeniowych stwierdzono, iż spadek wartości sztywności może być powodem zmian energetycznych, prowadzących do degradacji materiału oraz zmian zachodzących na poziomie strukturalnym na etapie rozwoju mikropęknięć. Ostatecznie wykazano wysoką zdolność MMA do regeneracji po zastosowaniu procesu ogrzania. Proces polegający na czasie odpoczynku daje niewielkie rezultaty rzędu kilku do kilkudziesięciu procent. Na podstawie sporządzonych diagramów stwierdzono, iż proces dostarczenia energii do układu w postaci ciepła powoduje odzyskanie ok. 84% wartości modułu sztywności i do ok. 90% trwałości zmęczeniowej dla wymuszenia oraz 72% wartości modułu i 69% trwałości dla . Wyniki odniesiono do obserwacji innych badaczy, potwierdzając wpływ przemiany energii na procesy niszczące i regenerujące w MMA. Trzeba mieć jednak na uwadze, że gdy uszkodzenia na poziomie struktury są zbyt duże, próbka podatna jest na „healing” tylko do pewnego poziomu. Zrozumienie lepiej tego zagadnienia wymaga jednak wykonania badań na poziomie strukturalnym dla większej liczby i bardziej zróżnicowanych przypadków. Będzie to przedmiotem kolejnych badań autora. Niniejszy artykuł wykazuje, iż zagadnienie „healingu” przy projektowaniu MMA jest ważne i powinno być uwzględniane przy projektowaniu nawierzchni drogowych przeznaczonych pod duże obciążenia. Warto także pamiętać, że odpowiednie zabiegi utrzymaniowe mogą wydłużyć okres eksploatacji budowanych nawierzchni i ograniczyć jej pękanie. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Bańkowski, W. 2006. Analiza trwałości zmęczeniowej kompozytów mineralno-asfaltowych metodą konwencjonalną oraz metodą energii rozproszonej. PhD, Politechnika Warszawska.
- [2] Bhasin, A., Desai, C. S., Monismith, C. L., Schwartz, C. W., Little, D. N., Hiltunen, D. R., Olard, F., Maupin, G. W., Chehab, G. R., Lee, H. J., Di Benedetto, H., Bahia, H. U., Daniel, J. S., Harvey, J. T., Kaloush, K. E., Momen, M., Lytton, R. L., Roque, R., Weissman, S. L., Hesp, S. A. M., Underwood, S., Pellinen, T. K., Yun, T. Y., Buttlar, W. G., Kim, Y. R., and Seo, Y. 2009. Modeling of asphalt concrete. McGraw-Hill construction. McGraw-Hill, New York.
- [3] Bhasin, A., Little, D. N., Bommavaram, R., and Vasconcelos, K. 2008. A Framework to Quantify the Effect of Healing in Bituminous Materials using Material Properties. Road Materials and Pavement Design 9, sup1, 219–242.
- [4] Huang, S.-C. and Di Benedetto, H. 2015. Advances in Asphalt Materials. Road and Pavement Construction. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Elsevier Reference Monographs, s.l.
- [5] Jasztal, M. 2016. Strength evaluation of cracked structure. Mechanik, 7, 708–709.
- [6] Judycki, J. 2014. Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Praca zbiorowa. WKiŁ, Warszawa.
- [7] Kim, Y. R. 2009. Modeling of asphalt concrete. McGraw-Hill construction. ASCE Press, Reston, VA.
- [8] Kłysz S. Podstawy mechaniki pęknięcia. Podstawy eksploatacji statków powietrznych. DOI=10.13140/RG.2.1.1669.2247.
- [9] Liu, Q., Li, B., Schlangen, E., Sun, Y., and Wu, S. 2017. Research on the Mechanical, Thermal, Induction Heating and Healing Properties of Steel Slag/Steel Fibers Composite Asphalt Mixture. Applied Sciences 7, 10, 1088.
- [10] Liu, Q., Schlangen, E., van de Ven, M., van Bochove, G., and van Montfort, J. 2012. Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test. Construction and Building Materials 29, 403–409.
- [11] Mackiewicz, P. 2016. Trwałość zmęczeniowa mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych w nawierzchniach drogowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej; Politechnika Wroclawska., Wrocław.
- [12] Mackiewicz, P. 2018. Fatigue cracking in road pavement. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 356, 1–10.
- [13] NCHRP. 2010. Top-Down Cracking of Hot-Mix Asphalt Layers: Models for Initiation and Propagation. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [14] Neimitz, A. 1998. Mechanika pęknięcia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [15] PKN. 2018. Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 24: Odporność na zmęczenie 93.080.20 93.080.20, PN-EN 12697-24:2018-08.
- [16] Qiu, J., Ven, M. F. C., Schlangen, E., Wu, S., and Molenaar, A. A. A. 2012. Cracking and Healing Modelling of Asphalt Mixtures. In Cracking and Healing Modelling of Asphalt Mixtures, A. Scarpas, N. Kringos, I. Al-Qadi and L. A., Eds. Springer Netherlands, Dordrecht, 1135–1144. DOI=10.1007/978-94-007-4566-7\_108.
- [17] Riara, M., Tang, P., Mo, L., Javilla, B., and Wu, S. 2018. Investigation into crack healing of asphalt mixtures using healing agents. Construction and Building Materials 161, 45–52.
- [18] Sarsam, S. I. 2015. Crack Healing Potential of Asphalt Concrete Pavement. IJSRK 3, 1, 1–12.
- [19] Vanelstraete, A. 2014. Prevention of Reflective Cracking in Pavements. CRC Press.
- [20] Wang, L. 2011. Mechanics of asphalt. Microstructure and micro-mechanics. McGraw-Hill, New York