

Mikrotomografia komputerowa w służbie inżynierii drogowej



mgr inż.
ERYK MAĆZKA
Politechnika Wrocławska
Katedra Dróg i Lotnisk
ORCID: 0000-0002-5420-5242

W artykule o charakterze przeglądowym zaprezentowano potencjał mikrotomografii komputerowej, która może zostać zastosowana do badań i analiz strukturalnych materiałów drogowych takich jak mieszanki mineralno-asfaltowe.

Metody badawcze materiałów drogowych, takich jak np. mieszanki mineralno-asfaltowe (MMA), zaliczanych do kompozytów, rozwija się od połowy XX wieku. Odmienna reakcja materiału na czynniki: mechaniczne (obciążenie kołami pojazdów, ścieranie nawierzchni), środowiskowe (cykliczne zmiany wilgoci i temperatury otoczenia), technologiczne (skład mieszanki i warunki produkcyjno-montażowe) oraz chemiczne (agresja siarczkowa lub chlorkowa w utrzymaniu zimowym nawierzchni) powoduje, że trudno jest stworzyć spójne wymogi prawne umożliwiające zaprojektowanie i wykonanie mieszanki cechującej się odpowiednią wytrzymałością i trwałością. W Polsce od 2014 roku funkcjonuje regulacja prawna zwana Warunkami Technicznymi (WT-2) [1], która pozwala zaprojektować różne rodzaje MMA. Każda z mieszank w zależności od przeznaczenia posiada szereg wymogów (np. odpowiednią zawartość wolnych przestrzeni, sztywność, trwałość wyrażoną ilością cykli zmęczeniowych), które należy spełnić w odpowiednich warunkach. Jest to aproksymacja warunków *in situ*, którą realizuje się badaniami laboratoryjnymi, takimi jak test czteropunktowego zginania 4-PB (wytrzymałość, trwałość zmęczeniowa), zginanie próbki półwałcowej SCB (graniczna wartość odporności materiału na pęknięcie), metoda A lub B wyznaczania gęstości objętościowej MMA (zawartość wolnej przestrzeni). Wspomniane testy badawcze wykonuje się zgodnie z procedurami normowymi wynikającymi z długoletnich badań, lecz zdecydowana większość z nich oparta jest na analizach wytrzymałościowych lub fizycznych. Obecne podejście do badania materiałów drogowych stanowi duży problem, ponieważ pomimo swojej skuteczności nie pozwala uwzględnić mechanizmów zachodzących na poziomie

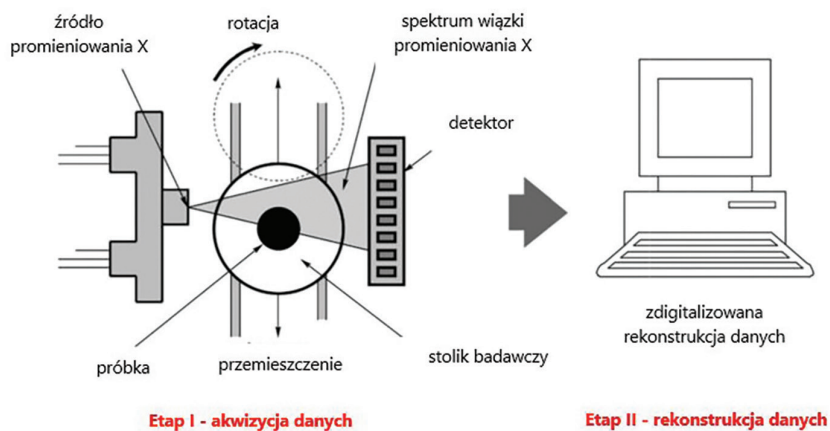
mikrostrukturalnym oraz przebadać zmian w interakcji lepszczą, wolnej przestrzeni oraz kruszywa. Analiza wewnętrznej struktury złożonego materiału jakim są MMA oraz zjawisk w nich zachodzących (jak np. nukleacja i propagacja pęknięć) niewątpliwie pozwoliłaby zoptymalizować skład MMA pod względem większej trwałości. W tym celu przydatne mogą być nowoczesne metody pomiarowe, takie jak mikrotomografia komputerowa, która została przedstawiona w niniejszym artykule jako przykład skutecznych badań nad strukturą materiałów drogowych.

Przegląd zastosowania mikrotomografii komputerowej w badaniu materiałów drogowych

Podstawa teoretyczna tomografii komputerowej sięga lat dwudziestych ubiegłego wieku. Pierwotnie stosowano konwencjonalną radiografię w postaci obrazowania 2D, która jest „przodkiem” obrazowania 3D. Biorąc pod uwagę ograniczenia techniczne, rozwój tomografii komputerowej nastąpił dopiero kilkadziesiąt lat później. Pierwotnym obszarem użycia tej metody była medycyna – obrazowanie chorób i uszkodzeń wewnętrznych u pacjentów z wykorzystaniem wiązki promieniowania X (ang. X-ray). Dokładny rys historyczny i opis „pionierów” jest wyszczególniony przez Curriego III w [2]. Rozwój techniki, sprzętu komputerowego i skomplikowanych algorytmów matematycznych sprawił, że użycie tomografu zainteresowało naukowców z innych dziedzin technicznych. Jako pierwsi w 1993 r. Synolakis i inni [3] przeprowadzili analizę materiałów drogowych – betonu asfaltowego, korzystając z prześwietlania X-ray. Ich praca pozwoliła zrozumieć mechanizm penetracji wiązki przez MMA, uwzględniając grubość próbki oraz inne niezbędne

parametry – np. natężenie, napięcie (energię) wiązki. Efektem tej pracy były wykonane w 1999 r. przez Braza i innych [4] pierwsze badania betonu asfaltowego związane z obserwacją propagacji pęknięcia w teście zmęczeniowym rozciągania pośredniego (ITT). Zaobserwowano, że pęknięcie pojawiło się i przebiegło przez centralną część walca – miejsca wystąpienia największego skupiska pustek powietrznych osłabiających przekrój. W 1999 r. wykonano również (Masad i in.) [5] pierwsze analizy ułożenia składników betonu asfaltowego, korzystając z prasy żyratorowej do uzyskania stosownego zagęszczenia. Praca pozwoliła lepiej zrozumieć proces technologiczny – ułożenie składników w mieszance. Kolejno Shashidhar [6] badał miejsce koncentracji pustek powietrznych w betonie asfaltowym w zależności od ilości obrotów w prasie żyratorowej. Artykuł pozwolił ustalić wpływ czasu trwania zagęszczenia na rozmieszczenie pustek. Następnie w 2001 r. Romero i inni [7] próbowali przeanalizować zależności pomiędzy uzyskanym obrazem tomograficznym a właściwościami betonu asfaltowego. Ustalono, że w MMA o grubości ziaren mniejszej niż 25 mm można próbować znajdować korelacje pomiędzy zrekonstruowanym obiektem objętościowym a zespolonym postaciowym modelem G*. Warto wyróżnić także pracę Wangu i innych [8], którzy analizowali trzy rodzaje MMA WesTrack (różniące się maksymalną grubością ziarna) pod kątem powstawania uszkodzeń. Korzystając z tomografu komputerowego, ustalono, że mieszanka gruboziarnista pod wpływem obciążenia jest bardziej zniszczona niż badane mieszanki drobnoziarniste. W 2002 r. Tashman i inni [9] wykonali eksperyment pozwalający przeanalizować rozmieszczenie pustek powietrznych i kruszywa względem dwóch miejsc mieszanki

ki zagęszczanej żyratorowo: rdzenia próbek walcowej oraz jego zewnętrznej części. Analizy wykonywano, posiłkując się uzyskanymi przekrojami 2D. Efektem starań autorów było ustalenie wpływu zagęszczania na rozłożenie kruszywa i wolnej przestrzeni w całej próbce. Podobną pracą jest publikacja Partla i innych z 2003 r. [10] skupiająca się na analizie zmian w homogeniczności i izotropii szwajcarskiego betonu asfaltowego (mieszanki) zagęszczanego żyratorowo. Do badań wykorzystano dwie metody badawcze – standardową i tomograficzną. Potwierdzono zbieżność otrzymywanych wyników, wskazując, że obrazowanie z użyciem X-ray pozwala uzyskać zadowalające rezultaty i może być z powodzeniem używane przy analizie zagęszczenia. Następnie, w tym samym roku, pojawiła się praca Wang i innych [11], w której podjęto próbę empirycznego wyznaczenia tensora uszkodzenia przesświetlonej tomografem mieszanki z betonu asfaltowego typu WesTrack podczas analizy przekroju 2D. Na podstawie przyjętych kryteriów oraz stereologicznej identyfikacji autorom udało się wyprowadzić tensor uszkodzeń, wiążąc go „matematycznie” ze spękaniem występującym na badanej powierzchni. Twórcy pracy podkreślili jednak, że pozyskany zapis jest pewnym przybliżeniem zachowania się materiału, więc efekt fizyczny może odbiegać od matematycznego. W 2007 r. Gopalakrishnan i inni [12] badali wpływ parametrów testu (np. mocy wiązki) z użyciem tomografu na otrzymany rezultat. W artykule skupiono się na materiałach drogowych, takich jak beton asfaltowy oraz cement portlandzki. Autorzy wskazali, że użyta konfiguracja badania znacząco wpływa na otrzymane wyniki i zasugerowali, iż należy ją kalibrować indywidualnie do badanych materiałów. W tym samym roku pojawiło się również ważne opracowanie Partla i innych [13], w którym porównano trzy metody zagęszczenia MMA – płytowe, marshallowskie, żyratorowe. Inspirując się wcześniejszymi badaniami X-ray dotyczącymi zagęszczenia MMA w prasie żyratorowej, autorzy pokazali różnice w zawartości pustek powietrznych badanej mieszanki zależną od czasu trwania tego procesu. Im dłużej trwa zagęszczenie, tym większa rozbieżność w objętościowej zawartości pustek względem porównywanych metod. Różnice mogą sięgać nawet do kilku procent (w skali objętości). Omówione badania z wykorzystaniem X-ray do analizy materiałów drogowych wykonywane były z zastosowaniem niskiej rozdzielczości. Wynikiem postępu technologicznego (szeroko opisanego przez Stocka i Plessisa w [14, 15]) stał się tomograf, pozwalający analizować materiały w wysokiej rozdzielczości (mikro i nano). Dopiero w 2008 roku przeprowadzono pierwsze badania z zastosowaniem wysokiej rozdzielczości. Naukowcem, który się tego podjął, był Jadhav [16].



Rys. 1. Schemat obrazowania materiałów z wykorzystaniem mikrotomografii komputerowej



Rys. 2. Mikrotomograf phoenix oraz próbka na stanowisku badawczym

Z upływem czasu i rozwojem możliwości technicznych sprzętu badano różne typy MMA w zależności od różnych czynników, nie tylko od sposobu zagęszczenia, ale przede wszystkim zwrócono uwagę na zjawiska zachodzące w trakcie eksploatacji materiałów drogowych. W dalszej części artykułu zostaną zaprezentowane wybrane badania w zakresie struktury MMA, zmęczenia, pęknięcia, wpływów termicznych oraz agresji chemicznej pokazującej potencjał nowoczesnej tomografii o wysokiej rozdzielczości.

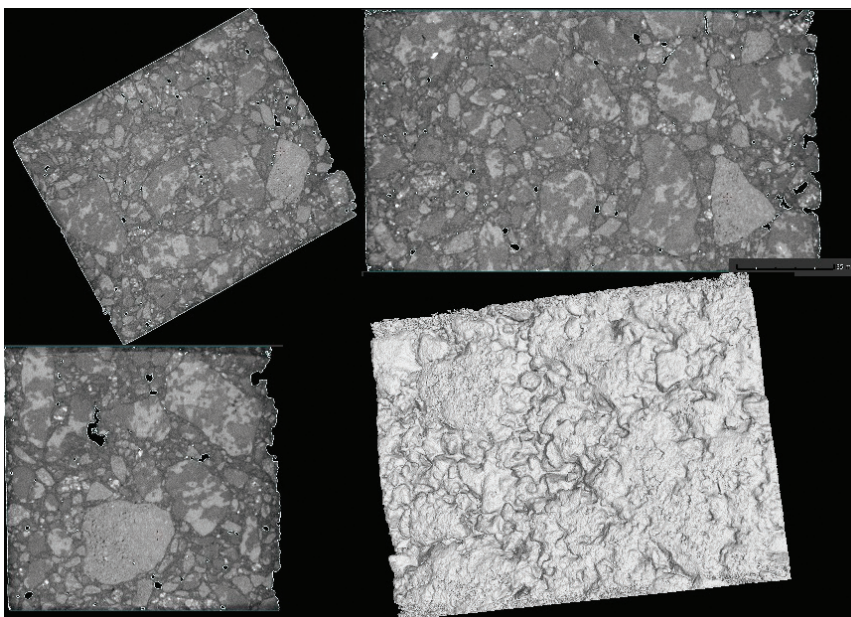
Metoda pomiaru w tomografii komputerowej

W technice tomografii komputerowej proces pomiarowy dzieli się na dwa etapy: akwizycję (etap pierwszy) oraz rekonstrukcję danych (etap drugi). Schemat obrazowania (ideę) zamieszczono na rys. 1.

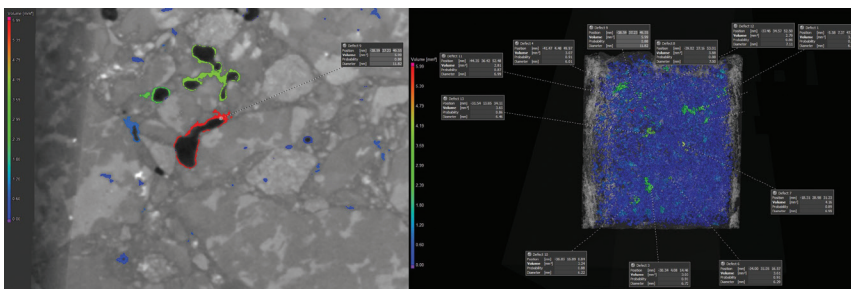
Etap pierwszy składa się z kilku czynności. Na początku należy odpowiednio (stabilnie) zamontować próbkę. Kolejno ustalić obszar zainteresowania (ang. *Region of Interest* – ROI) oraz satysfakcjonującą nas dokładność badania (rozdzielczość obserwowanego miejsca). Następnie wprowadza się parametry samego badania – moc, natężenie wiązki promieniowania, filtry umożliwiające uzyskanie odpowiedniego kontrastu, ilość składników badanego materiału, czas badania, ilość zdjęć potrzebnych do aproksymacji

modelu. Precyzyjne ustalenie wielu początkowych parametrów gwarantuje uzyskanie dokładnych wyników i wymaganej jakości obrazowania struktury materiału. Dopiero gdy te elementy zostaną ustalone, maszyna rozpoczyna naświetlanie wiązką promieni X. Przykładową próbkę na stanowisku badawczym zamieszczono na rys. 2.

Pomiar polega na emisji wiązki promieniowania X ze źródła (lampy rentgenowskiej) przez kolimator (w celu uporządkowania kierunku emisji wiązki). Następnie próbka poddana jest ekspozycji na to promieniowanie. Podczas tego procesu część promieniowania jest zaabsorbowana przez obiekt, a część ulega dalszej transmisji. Promieniowanie X, które prześwietla obiekt, rejestrowane jest przez detektor w postaci zróżnicowanego natężenia strumienia promieniowania X. Wspomniana rozbieżność odbieranej wiązki spowodowana jest zmienną gęstością i grubością badanego obiektu. Promieniowanie X zarejestrowane przez detektor przetwarzane jest za pomocą algorytmów na obraz, w klasycznym ujęciu w skali szarości. W ten sposób powstaje pojedynczy radiogram (obraz 2D). Aby umożliwić na dalszych etapach procesu utworzenie obrazu 3D, podczas badania próbka zmienia swoją pozycję, doznając rotacji względem osi stolika wewnątrz komory badawczej. W odpowiednich pozycjach wykonywane są seryjnie zdjęcia materia-



Rys. 3. Ułożenie składników w mieszance mineralno-asfaltowej pokazane na trzech rzutach 2D i zrekonstruowanym modelu 3D



Rys. 4. Przykładowa analiza porowatości mieszanki mineralno-asfaltowej

tu niezbędne do pozyskania trójwymiarowego obrazu. Sumarycznie obiekt podlega obrotowi o kąt pełny (360 stopni). Jeżeli zachodzi potrzeba zbadania większej (objętościowo) próbki, stolik z obiektem dodatkowo doznaje przemieszczenia pionowego. Akwizycja danych kończy się przesłaniem do komputera zarejestrowanych zdjęć. Należy wspomnieć, że pierwszy etap jest kluczowy, ponieważ od niego zależy, jakiej jakości obraz zostanie ostatecznie uzyskany po rekonstrukcji.

Etap drugi – rekonstrukcja danych – dotyczy przetworzenia otrzymanych zdjęć i dalszej ich obróbki. Na tym etapie z obrazów 2D jest składany model 3D. Proces odbywa się z użyciem specjalistycznego oprogramowania, które ostatecznie pozwala stworzyć plik „wsadowy” do przeprowadzenia analiz materiału w przeznaczonej do tego aplikacji.

Wybrane przykłady zastosowania pomiaru w tomografii komputerowej

Zawansowane stosowanie tomografii w wysokiej rozdzielczości z uwzględnieniem zmian strukturalnych oraz ocenę homogeniczności MMA poruszano od 2008 roku w pracach np. Cnuddea [17] – analizowano rozlokowanie składników i pustek powietrznych betonu, porównując wyniki z inną tech-

niką pomiarową (porozymetria rtęciowa), Taniguchiego [18] – badano wpływ skali szarości poszczególnych składników na interpretację ich zagęszczenia w całym skanowanym kompozycie, Xinga [19] – wykonano testy jakościowego obrazowania mieszanek typu beton asfaltowy i mastyks grysowy w celu pozyskania jak najlepszego kontrastu mikrostruktury w przeprowadzonym badaniu, Mackiewicz [20] – śledzono zmiany mikrostruktury i spękań betonu asfaltowego w badaniu zmęczeniowym, oraz Mackiewicz [21] – śledzono zmiany w okolicach pustek powietrznych mieszanki typu beton asfaltowy przed i po aplikacji testu zmęczeniowego 4-PB.

Kontynuację badań struktury wewnętrznej i poszukiwanie defektów materiałowych w wyniku procesów zmęczeniowych realizuje autor niniejszego artykułu. Za pomocą metody pomiarowej X-ray wstępnie (przed testami zmęczeniowymi) identyfikuje się na całości obrazowanego elementu ułożenie składników w wytworzonej mieszance, np. czy występują miejsca koncentracji ziaren grubych lub znaczne pustki powietrzne. Przykładowy widok lokalizacji poszczególnych składników mieszanki po obrazowaniu zamieszczony jest na rys. 3., przedstawiającym zrekonstruowany model 3D przecięty trzema płaszczyznami.

Po wstępnej analizie można dostrzec równomierne rozłożenie składników mieszanki – co oznacza, że została poprawnie wykonana technologicznie.

Na drugim etapie można przeprowadzić ocenę ilościową i jakościową porowatości materiału – zamkniętych pustek powietrznych. W Polsce wg WT-2 [1] każda MMA posiada wymóg odpowiedniej zawartości wolnych przestrzeni. Wykorzystując potencjał programów komputerowych, jesteśmy w stanie monitorować ilościowo ich zawartość nie tylko na etapie projektowania czy wykonawstwa, ale również w okresie eksploatacji nawierzchni – dokonując stosownych cyklicznych odwiertów, które są poddawane testowi w maszynie. Metoda badawcza pozwala określić rozkład porów w mieszance przy jednoczesnym sparametryzowaniu cech fizycznych, jak: objętość, średnica, pole powierzchni, lokalizacja w modelu. Algorytm aplikacji pozwala wysegregować pustki powietrzne i zliczyć ich np. całkowitą objętość zajmowaną w badanym materiale, stosownie do zadanych parametrów. Przykład wykonanej przez autora analizy oraz wskazanie wyróżniającej się pustki w modelu (oznaczonej kolorem czerwonym) zamieszczono na rys. 4.

Znaleziona pustka jest większa od innych, jej objętość wynosi aż 5,99 [mm³]. Objętość pozostałych porów powietrznych zawiera się w przedziale od 0,0001–3 5 [mm³]. Wystąpienie tak dużej pustki może mieć znaczący wpływ na obniżenie trwałości materiału. Analizy wpływu takich defektów będą przedmiotem odrębnego opracowania.

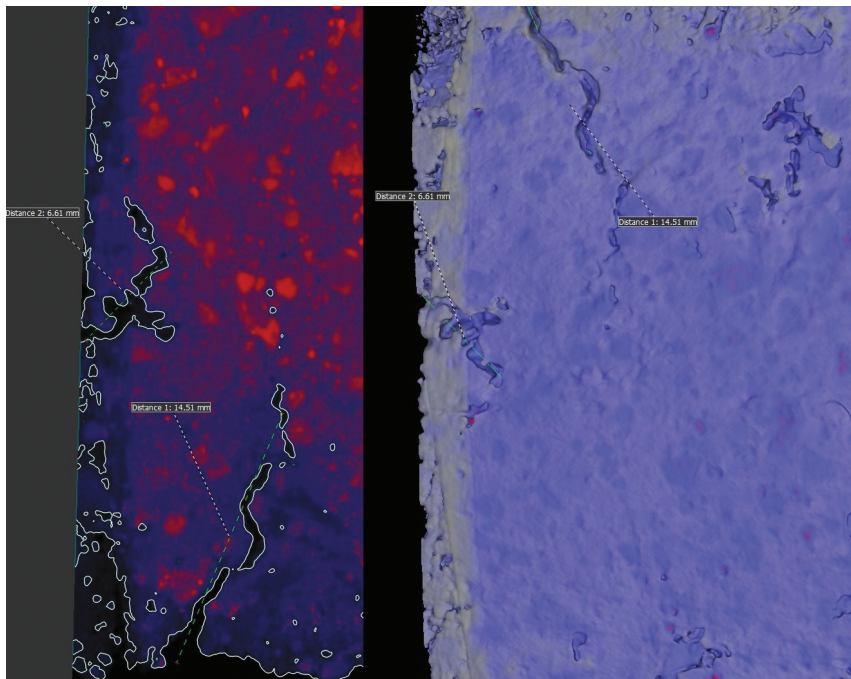
Warto wspomnieć, że pustki powietrzne są potrzebne w określonej ilości, gdyż stanowią jeden z elementów szkieletu MMA. Ograniczają zawartość asfaltu oraz zdolność do koleinowania się mieszanki. Należy jednak pamiętać, że należą one do naturalnych koncentratorów naprężeń (miejsca w materiale, gdzie na granicy z pustką dochodzi do spiętrzeń naprężeń), w obrębie których następuje inicjacja i propagacja pęknięcia w trakcie zmęczenia. Zjawisko to jest bardzo niebezpieczne, z uwagi na nagłe jego wystąpienie, często niezwiązane z typową oceną wytrzymałościową, dlatego też duże pustki lub ich znacząca ilość niekorzystnie wpływają na trwałość MMA. Naukowcy jak Mackiewicz, Lu, Naragani [20, 22, 23] podjęli próby przeprowadzenia analiz strukturalnych związanych z wykorzystaniem tomografii do monitorowania zmian zachodzących w okolicach defektów (pustek). Naukowcy potwierdzili trafność zastosowania tej metody do oceny zmian i wytrzymałości materiału na pęknięcie.

Należy zasygnalizować, że wystąpienie pęknięć w materiale w pobliżu pustek powietrznych nie jest regułą. Częstym zjawiskiem, zachodzącym szczególnie w niskich temperaturach (poniżej 0°), jest inicjacja pęk-

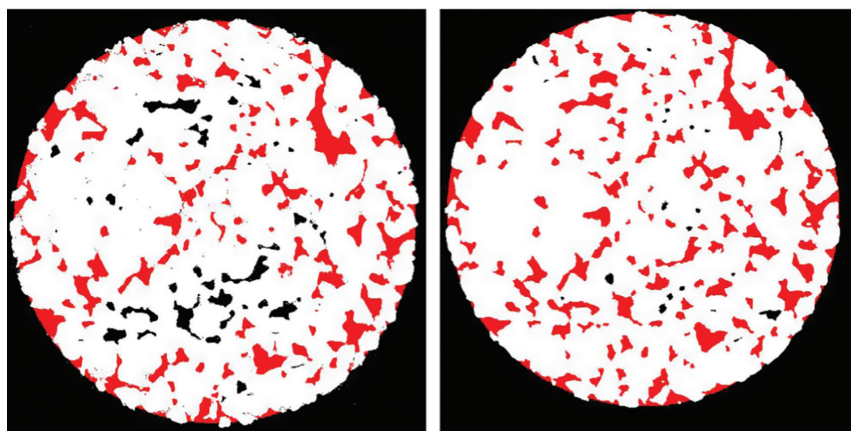
nięć w strefie rozciąganej. Na rys. 5. autor artykułu przedstawił na podstawie obrazowania X-ray makro pęknięcie uzyskane z badań własnych w teście 4PB. Pęknięcie zidentyfikowano na krawędzi próbki. Jego długość wynosi 14,51 [mm], a szerokość 0,69 [mm]. Zaletą wykorzystania metody tomograficznej jest identyfikacja zmian w materiale – nie tylko samych pustek powietrznych lub defektów, lecz także pęknięć, które powstają podczas eksploatacji, także dla próbek pobranych z nawierzchni drogowej.

Kolejnym przykładem zastosowania tomografii komputerowej w inżynierii drogowej jest obrazowanie MMA poddanej wpływowi wysokich temperatur – obróbka termiczna w celu ustalenia odporności na zjawisko koleinowania. W 2019 roku naukowcy z Chin: Deng, Gu, Wang, Wu i Zhu [24] wykonali pierwsze pionierskie testy zmian strukturalnych mieszanki wywołanych temperaturą, ukazując powstawanie deformacji trwałych przy jednoczesnym zaniku zamkniętych pustek powietrznych. W swoich badaniach wyszczególnili przyczyny i efekty działania tego czynnika, które wymuszały konsolidację mieszanki oraz wypychanie zamkniętego wewnątrz powietrza poza obszar materiału. Przykładowy rezultat zmian zachodzących w betonie asfaltowym zamieszczono na rys. 6.

Innym zastosowaniem tomografii komputerowej do badań materiałów drogowych jest ocena wpływu czynników chemicznych na degradację materiału mieszanki. Jest to nowość w zakresie badań z użyciem X-ray, nieporuszana do tej pory przez naukowców. Podczas zabiegów utrzymaniowych (szczególnie w zimie) na drogach stosuje się różne preparaty zapobiegające oblodzeniu. Najczęściej jest to sól drogowa, reagująca bezpośrednio z wierzchnią warstwą asfaltową. Pod wpływem agresji chlorkowej następuje osłabienie wiązań „chemicznych” pomiędzy zespolonymi ziarnami kruszywa i lepiszczem asfaltowym, powodując spadek właściwości użytkowych (np. sztywności) penetrowanej przez sól warstwy nawierzchni. W efekcie dochodzi do widocznych wykruszeń ziaren kruszywa i asfaltu z MMA. Stosując obserwacje w tomografii, można analizować ingerencję soli drogowej w mieszance oraz ustalić ilość soli „połączonej” z lepiszczem lub odstoniętym kruszywem mieszanki – wynik reakcji chemicznej. Podobnie jak przy analizie porowatości, oprogramowanie umożliwia pozyskanie informacji o powierzchniowym i objętościowym pokryciu. Odpowiednie połączenie badań laboratoryjnych i obrazowania X-ray pozwoliłoby na przygotowanie niezależnych wytycznych uwzględniających agresję chlorkową w projektowaniu MMA, czego do tej pory nie zastosowano w WT-2 [1], a wydaje się mieć fundamentalne znaczenie. Przykładowe wykonane przez autora tego opracowania analizy chlorkowe (wynikające z moczenia próbek w roztworze so-



Rys. 5. Przykładowe spękanie powstałe podczas badania zmęczeniowego 4PB



Rys. 6. Deng, Gu et al. 2019 – Ocena zmiany struktury pod wpływem wysokotemperaturowej obróbki termicznej [24]

lanki o odpowiednim stężeniu) znajdują się na rys. 7. Kolorem fioletowym zaznaczono pokrycie solą drogową.

Na zamieszczonym rysunku pokazano: zdjęcie betonu asfaltowego pokrytego solą, najbardziej zewnętrzny przekrój – zewnętrzną płaszczyznę badanej mieszanki oraz powierzchnię ustroju solankowego w zrekonstruowanym modelu 3D. Warto nadmienić, że po rekonstrukcji oraz zastosowaniu właściwych algorytmów obliczeniowych w programie otrzymano informację o tym, iż około 86% powierzchni próbki prawdopodobnie przereagowało z roztworem i zespoliło się z próbką. Efektem tego zjawiska jest prawdopodobnie spadek wytrzymałości całej struktury mieszanki, co zostanie poddane dyskusji w osobnym opracowaniu.

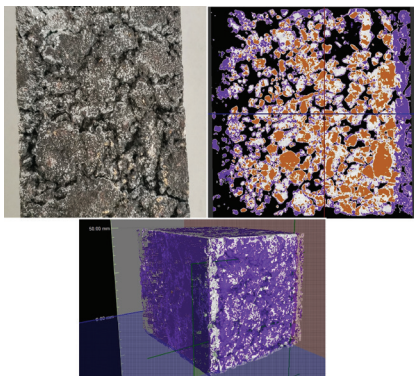
Podsumowanie

W pracy zaprezentowano wybrane metody zastosowania tomografii komputerowej w ocenie technologicznej kontroli jakości –

homogeniczność mieszanki, w analizie porowatości, analizie spękań, kolein oraz w ocenie oddziaływania agresji chemicznej wywołanej solą drogową, co – jak warto podkreślić – jest nowością w obecnym stanie wiedzy.

Na podstawie zaprezentowanych różnych metod pomiarowych z wykorzystaniem tomografu komputerowego oraz efektów badań wykazano istotny potencjał techniki badawczej w wysokiej rozdzielczości, znajdującej zastosowanie w śledzeniu zmian mikrostrukturalnych zachodzących w MMA podczas zagęszczania, zmęczenia czy też oddziaływania soli. Należy stwierdzić, że możliwości mikrotomografii komputerowej w zakresie badań materiałów drogowych są bardzo duże. Metoda ta może być wykorzystana zarówno na etapie optymalizacji składu w laboratorium, weryfikacji eksploatowanych nawierzchni, jak i badania zjawisk pod wpływem różnych czynników. Warto dodać, że obrazowanie X-ray koncentruje się głównie na „prześwietlaniu” materiału, korzystając z wiąz-

rys. 6. arch. H. Deng, X. Gu, X. Wang, Ch. Wu and Ch. Zhu. 2019. Evaluation of high-temperature deformation of porous asphalt mixtures based on microstructure using X-ray computed tomography. Construction and Building Materials 227, 116623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.004>



Rys. 7. Przykładowa chlorkowa agresja chemiczna w MMA ukazana za pomocą obrazowania X-ray

ki promieniowania rentgenowskiego, zatem można to badanie zaliczyć do kategorii nieszczygających w zakresie technologii materiałów drogowych na etapie laboratoryjnym – co jest znaczącą zaletą.

Szczegółowa analiza zjawisk zachodzących w materiałach drogowych dzięki obrazowaniu micro-CT pozwoliła dokładniej oceniać wytrzymałość i trwałość materiału oraz znajdować przyczyny jego degradacji.

Wprowadzenie tomografii komputerowej do powszechnego użycia w inżynierii lądowej, opracowanie wytycznych badawczych i wymogów pozwoliłoby zoptymalizować obecne wymogi dotyczące projektowania składu MMA.

Korzystanie z tomografii komputerowej pozwoliłoby na wzrost jakościowy świadczonych usług w zakresie monitorowania nawierzchni drogowych oraz umożliwiłoby analizowanie zmian wewnątrz nawierzchni w perspektywie czasu.

Mikrotomografia komputerowa jako metoda badawcza nie tylko umożliwia analizę samego materiału z uwagą na defekty czy zmiany wywołane czynnikami mechanicznymi, lecz również pozwala badać wpływ czynników środowiskowych i chemicznych. Fakt ten sprawia, że należy ją zaliczyć do metod interdyscyplinarnych łączących różne dziedziny wiedzy – budownictwo, chemię, fizykę.

Literatura

[1] GDDKiA. 2014. Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych cz. I mieszanki mineralno-asfaltowe wymagania techniczne. WT-2.

[2] T.S. Curry III. 1990. Christensen's Physics of Diagnostic Radiology. Lea & Febiger, Philadelphia.

[3] C. Synolakis, M. Singh, Z. Zhou, S. Song, D. Shannon and R. Leahy 1993. Development of Asphalt Core Tomographer. SHRP-A656, 100pp.

[4] D. Braz, L.M.G. da Motta and R.T. Lopes. 1999. Computed tomography in the fatigue test analysis of an asphaltic mixture. "Applied Radiation and Isotopes" 50, 4, 661–671. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(98\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(98)00122-5).

[5] E. Masad, B. Muhunthan, N. Shashidhar and T. Harman. 1999. Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis. "Journal of Computing in Civil Engineering" 13, 2, 88–95. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1999\)13:2\(88\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1999)13:2(88)).

[6] N. Shashidhar. 1999. X-Ray Tomography of Asphalt Concrete. "Transportation Research Record" 1681, 1, 186–192. DOI: <https://doi.org/10.3141/1681-22>.

[7] P. Romero and E. Masad. 2001. Relationship between the Representative Volume Element and Mechanical Properties of Asphalt Concrete. "J. Mater. Civ. Eng." 13, 1, 77–84. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2001\)13:1\(77\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:1(77)).

[8] L.B. Wang, J.D. Frost and N. Shashidhar. 2001. Microstructure Study of WetTrack Mixes from X-Ray Tomography Images. "Transportation Research Record" 1767, 1, 85–94. DOI: <https://doi.org/10.3141/1767-11>.

[9] L. Tashman, E. Masad, J. D'Angelo, J. Bukowski and T. Harman. 2002. X-ray Tomography to Characterize Air Void Distribution in Superpave Gyrotory Compacted Specimens. "International Journal of Pavement Engineering" 3, 1, 19–28. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298430290029902a>.

[10] M.N. Partl, A. Flisch and M. Jönsson. 2003. Gyrotory Compaction Analysis with Computer Tomography. "Road Materials and Pavement Design" 4, 4, 401–422. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2003.9689956>.

[11] L.B. Wang, J.D. Frost, G.Z. Voyiadjis and T.P. Harman. 2003. Quantification of damage parameters using X-ray tomography images. "Mechanics of Materials" 35, 8, 777–790. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(02\)00206-5](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(02)00206-5).

[12] K. Gopalakrishnan, H. Ceylan and F. Inanc. 2007. Using X-ray computed tomography to study paving materials. "Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials" 160, 1, 15–23. DOI: <https://doi.org/10.1680/coma.2007.160.1.15>.

[13] M.N. Partl, A. Flisch and M. Jönsson. 2007. Comparison of Laboratory Compaction Methods using X-ray Computer Tomography. "Road Materials and Pavement Design" 8, 2, 139–164. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2007.9690071>.

[14] S.R. Stock. 2008. Recent advances in X-ray microtomography applied to materials. "International Materials Reviews" 53, 3, 129–181. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328008X277803>.

[15] A. Du Plessis and W.P. Boshoff. 2019. A review of X-ray computed tomography of concrete and asphalt construction materials. "Construction and Building Materials" 199, 637–651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.049>.

[16] M. Jadhav, Ed. 2008. Application of Digital Image Processing Techniques for Asphalt Concrete Mixture Images, Goa, India.

[17] V. Cnudde, A. Wirzner, B. Masschaele and P.J.S. Jacobs. 2009. Porosity and microstructure characterization of building stones and concretes. "Engineering Geology" 103, 3-4, 76–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.06.014>.

[18] S. Taniguchi, K. Ogawa, J. Otani and I. Nishizaki. 2013. A study on quality evaluation for bituminous mixture using X-ray CT. "Front. Struct. Civ. Eng." 7, 2, 89–101. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11709-013-0197-7>.

[19] Ch. Xing, H. Xu, Y. Tan, X. Liu, Ch. Zhou and T. Scarpas. 2019. Gradation measurement of asphalt mixture by X-Ray CT images and digital image processing methods. "Measurement" 132, 377–386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.066>.

[20] P. Mackiewicz. 2016. Trwałość zmęczenia mieszanki mineralno-asfaltowych stosowanych w nawierzchniach drogowych. Ofic. Wydaw. Politech. Wroc., Wrocław.

[21] P. Mackiewicz and A. Szydło. 2019. Application of X-ray tomography to assess fatigue structural changes in asphalt mixtures. DOI: <https://doi.org/10.24425/BPAS.2019.128604>.

[22] G. Lu, Ch. Wang, P. Liu, S. Pyrek, M. Oeser and S. Leischner. 2019. Comparison of Mechanical Responses of Asphalt Mixtures under Uniform and Non-Uniform Loads Using Microscale Finite Element Simulation. "Materials (Basel, Switzerland)" 12, 19. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12193058>.

[23] D. Naragani, M.D. Sangid, P.A. Shade, J.C. Schuren, H. Sharma, J.-S. Park, P. Kenesei, J.V. Bernier, T.J. Turner and I. Parr. 2017. Investigation of fatigue crack initiation from a non-metallic inclusion via high energy x-ray diffraction microscopy. "Acta Materialia" 137, 71–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.07.027>.

[24] H. Deng, X. Gu, X. Wang, Ch. Wu and Ch. Zhu. 2019. Evaluation of high-temperature deformation of porous asphalt mixtures based on microstructure using X-ray computed tomography. "Construction and Building Materials" 227, 116623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.004>.

DOI: 10.5604/01.3001.0014.0802

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Mączka Eryk, 2020, Mikrotomografia komputerowa w służbie inżynierii drogowej, „Builder” 05 (274). DOI: 10.5604/01.3001.0014.0802

Streszczenie: W artykule o charakterze przeglądowym zaprezentowano potencjał mikrotomografii komputerowej, która może zostać zastosowana do badań i analiz strukturalnych materiałów drogowych takich jak mieszanki mineralno-asfaltowe. Praca zawiera opis me-

todologii badania z użyciem mikrotomografu komputerowego przeznaczonego do dokładnych badań materiałowych. Zaprezentowano ocenę strukturalną materiału, analizę porowatości oraz wykorzystanie obrazowania tomograficznego do oceny mechanistyczno-wytrzymałościowego materiału. Na przykładzie nowatorskiej analizy agresji chemicznej wywołanej agresją chlorkową przedstawiono dodatkowe możliwości techniczne urządzenia. Artykuł kończy podsumowanie opisanych zastosowań tej metody badawczej w stosunku do mieszanek mineralno-asfaltowych. Wskazano na zalety i możliwości wprowadzenia mikrotomografii do powszechnego użycia w drogowej inżynierii lądowej.

Słowa kluczowe: mikrotomografia komputerowa, mieszanka mineralno-asfaltowa, materiał drogowy, badania strukturalne

Abstract: COMPUTER MICROTOMOGRAPHY IN THE SERVICE OF ROAD ENGINEERING. The article shows the potential of computer microtomography that can be used for research and structural analysis of road materials such as asphalt mixtures. The work contains a description of the research methodology using a computer microtomograph on the example of asphalt concrete. The paper discusses the structural assessment of the material, porosity analysis, the use of tomographic imaging to assess the mechanics and strength of the material, and presents a novelty in the form of an analysis of chemical aggression caused by chloride aggression. The article ends with a summary of the applications of this research methodology in relation to asphalt mixtures and indicates the advantages and possibilities of introducing microtomography for widespread use in road engineering.

Keywords: computer microtomography, asphalt mix, road material, structural test