



ADRIAN CIOŁCZYK

Politechnika Śląska
adrian.ciolczyk@polsl.pl
ORCID: 0000-0002-4484-4278



KONRAD WALOTEK

Politechnika Śląska
konrad.walotek@polsl.pl
ORCID: 0000-0001-5170-6941



JOANNA BZÓWKA

Politechnika Śląska
joanna.bzowka@polsl.pl
ORCID: 0000-0002-1765-7354

Możliwości wykorzystania cyfrowej korelacji obrazu do badań w budownictwie drogowym

Budownictwo drogowe podlega ciągłym zmianom ze względu na rozwój technologiczny i materiały. W ofercie firm drogowych pojawiają się nowe materiały, jak również nowy sprzęt do budowy dróg. Zmiany te niejednokrotnie wymuszają dostosowanie metod badawczych i sprzętu pomiarowego w celu określania właściwości tych materiałów. Następuje także rozwój samych narzędzi badawczych; jest proponowany nowy sprzęt do badań oraz modernizowany dotychczas wytwarzany. Proces modyfikacji obejmuje sprzęt badawczy przeznaczony do badań próbek materiałów, jak i nawierzchni drogowych. Jednym z takich nowych narzędzi badawczych jest cyfrowa korelacja obrazu (DIC). W artykule przedstawiono przegląd możliwych zastosowań cyfrowej korelacji obrazu w budownictwie drogowym. Na obecnym etapie metoda ta jest wykorzystywana przede wszystkim do badań naukowych, jednakże dalszy rozwój cyfrowej korelacji obrazu może doprowadzić do bardziej powszechnego stosowania jej do badań inżynierskich.

w tym między innymi obrazowania optycznego, elektronicznego i obrazowania sondą skanującą. Następnie przeprowadza się analizę obrazu za pomocą opartych na korelacji algorytmów dopasowywania (śledzenia lub rejestracji) i numerycznych podejść różnicowania w celu ilościowego wyodrębnienia pełnopolowych przemieszczeń i reakcji na odkształcenia materiałów, składników, struktur lub tkanek biologicznych. Metoda korelacji obrazu cyfrowego 3D jest szeroko stosowana do pomiarów przemieszczeń w warunkach laboratoryjnych oraz do zastosowań eksperymentalnych w przemyśle.

Istnieje duża liczba publikacji poświęconych aplikacjom korelacji obrazu cyfrowego. Sutton i in. (2009) [1] przedstawili historię stosowania tej metody w różnych obszarach i przeprowadzili szeroki zakres analizy wykorzystania DIC. Znane są zastosowania DIC w medycynie, przemyśle lotniczym, kosmicznym, samochodowym, w energetyce czy też w badaniach nowoczesnych materiałów, np. materiałów kompozytowych.

W budownictwie opisano następujące przykłady zastosowań DIC:

- w obszarze geotechniki, w charakterystyce metali, w badaniach kontrolnych [3, 4, 5]
- w pomiarach odkształceń: korelacji gradientu przemieszczenia drugiego rzędu [6]
- w badaniu propagacji pęknięć w materiałach kruchych, takich jak ceramika [7]
- w celu monitorowania procesu wzrostu pęknięć podczas cyklicznej trwałości zmęczeniowej [8]

Cyfrowa korelacja obrazu DIC

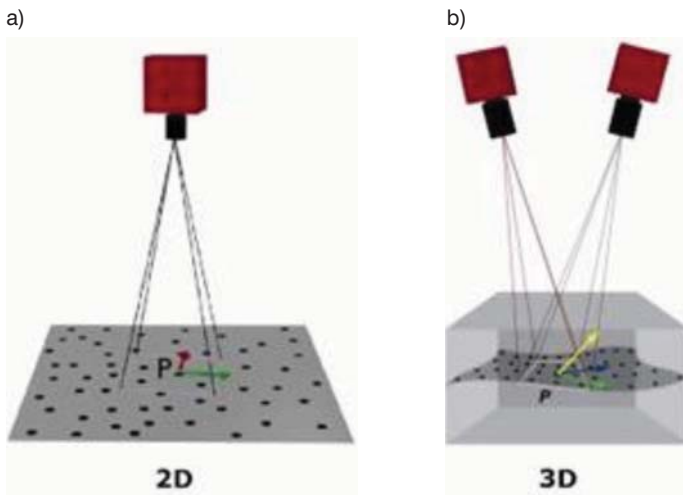
Obecnie nowoczesne systemy pomiarowe, takie jak cyfrowa korelacja obrazu (DIC), wykorzystywane są do przeprowadzania różnego rodzaju badań. System DIC i jego szerokie zastosowanie został po raz pierwszy opisany przez Suttona i in. [1]. Pan [2] i wielu innych badaczy zademonstrowało jego zastosowanie jako bezdotykowej metody optycznej opartej na obrazie do pomiaru kształtu, przemieszczenia i deformacji pełnego pola. Techniki DIC najpierw uzyskują cyfrowe obrazy obiektu przy różnych obciążeniach, różnych czasach lub stanach za pomocą cyfrowych urządzeń do obrazowania,



Rys. 1. Schemat systemu cyfrowej korelacji obrazu – system Aramis [13]

- do analizy mechanizmów odkształcenia przy ściskaniu poprzecznym w kompozycie wzmocnionym włóknem [9]
- do pomiarów odkształceń powierzchni [2]
- do pomiaru ścian murowanych [10]
- do pomiaru belek [11, 12]

W artykule przedstawiono potencjał pomiaru odkształceń badanych obiektów w drogownictwie za pomocą systemów DIC. Przykładem narzędzia pomiarowego DIC jest system pomiarowy ARAMIS 3D (rys. 1), który składa się z dwóch aparatów cyfrowych o wysokiej rozdzielczości, beam formera (HUB), źródła światła niebieskiego i jednostki liczącej (laptop). Wiązki (HUB) umożliwiają komunikację między kamerami a jednostką obliczeniową i zapewniają, że kamery mają odpowiednią ogniskową. Źródło światła niebieskiego oświetla badany obiekt, poprawiając dokładność pomiaru. Jednostka obliczeniowa wyposażona jest w odpowiednie oprogramowanie do wykonywania analiz i obliczeń na podstawie danych pomiarowych (z prasy testowej) oraz nagranego materiału wideo.



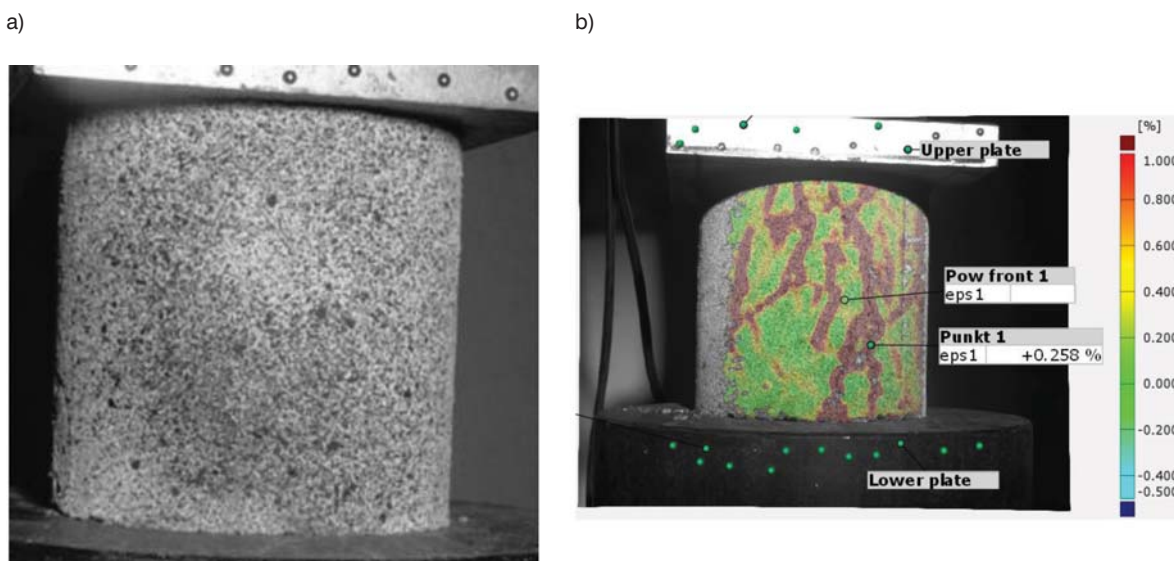
Rys. 2. Sposób pomiaru systemem cyfrowej korelacji obrazu: a) powierzchni płaskich 2D, b) przestrzennych 3D [13]

Wykorzystując jedną kamerę uzyskujemy możliwość rejestracji obrazu płaskiego 2D. Oznacza to, że za pomocą takiego systemu możliwe jest badanie płaskiego stanu naprężenia i odkształcenia (rys. 2a), natomiast łącząc dwie kamery skierowane na wspólną ogniskową (rys. 2b), system pomiarowy rejestruje obraz jako obraz trójwymiarowy. Po kalibracji urządzenia można wykonać automatyczne pomiary, a system ARAMIS jest w stanie samodzielnie odczytać rzeczywisty rozmiar badanych obiektów. Obszar pomiarowy objęty kamerami zależy od rozstawu i kąta wiązki pomiarowej (HUB). Wraz ze wzrostem wielkości badanego obiektu konieczne jest stosowanie coraz większych belek pomiarowych.

Za pomocą systemu pomiarowego ARAMIS 3D wykonuje się serię zdjęć poklatkowych badanego obiektu. Na podstawie zdjęć wykonanych aparatami o wspólnej ogniskowej, według skali szarości można śledzić i identyfikować punkty na każdym z kolejnych obrazów. Ich pozycje są przypisywane z dokładnością subpikseli. Następnie, na podstawie triangulacji, obliczane jest położenie każdego punktu w przestrzeni trójwymiarowej poprzez nałożenie obrazów z obu kamer. W ten sposób można zbudować trójwymiarowy model powierzchni badanego obiektu. Z wykorzystaniem trójwymiarowego modelu powierzchni badanego obiektu, za pomocą oprogramowania można określić przemieszczenia punktów w trójwymiarowym układzie współrzędnych oraz ich prędkości i przyspieszenia spowodowane obciążeniem. Ponadto za pomocą oprogramowania można kontrolować deformacje powierzchni obiektu testowego, tworząc mapę odkształceń.

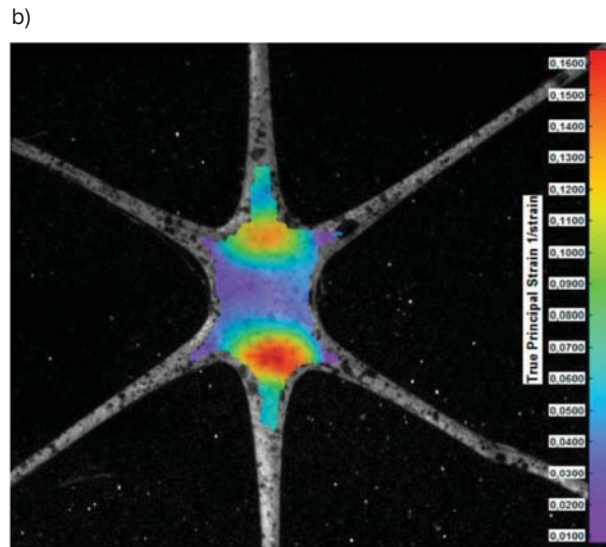
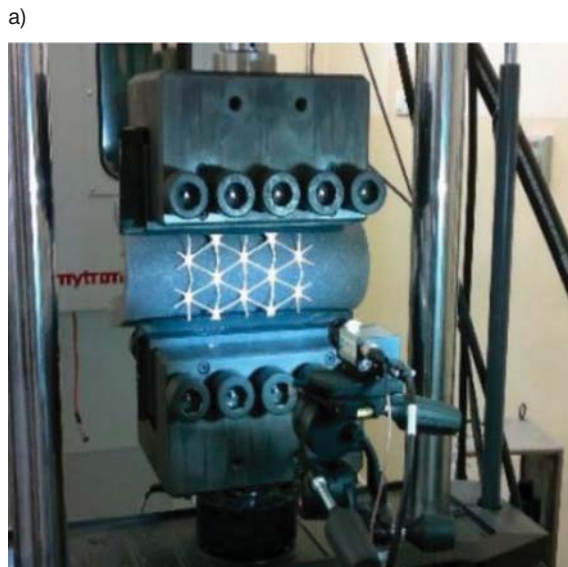
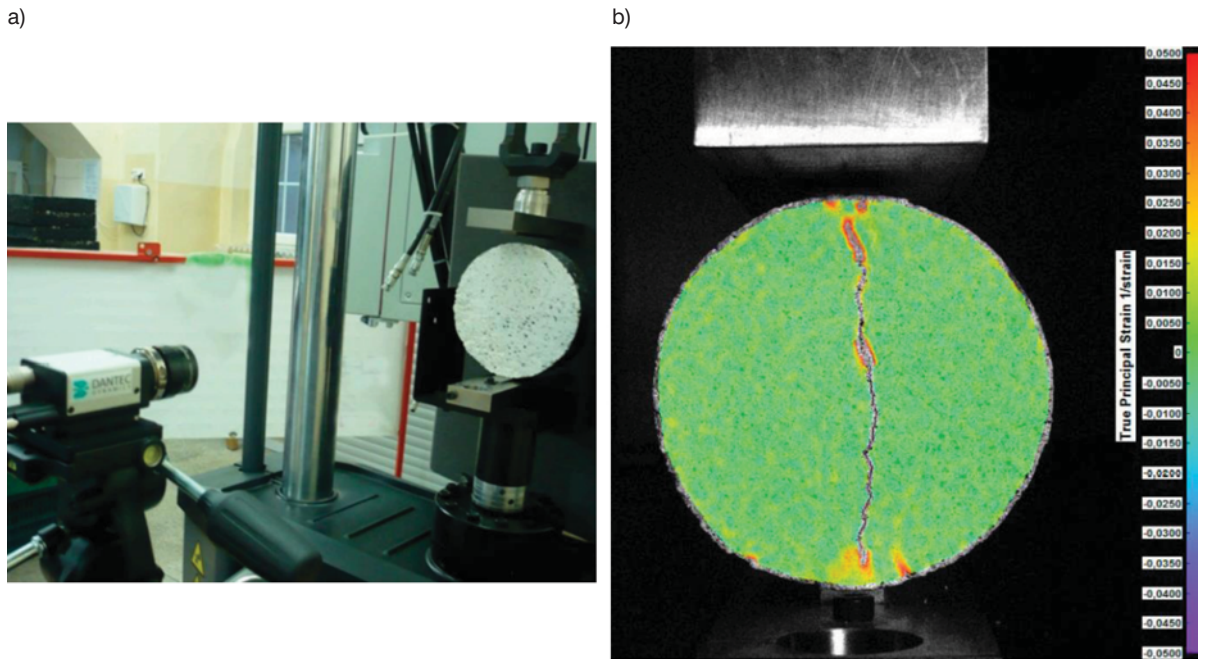
Badania laboratoryjne materiałów drogowych z wykorzystaniem DIC

Poniżej zaprezentowano możliwości wykonywania badań laboratoryjnych materiałów wykorzystywanych w budownictwie drogowym. Badania z wykorzystaniem cyfrowej korelacji obrazu pozwalają na dokładniejsze opisanie właściwości analizowanych materiałów. Podczas takiego sposobu bada-



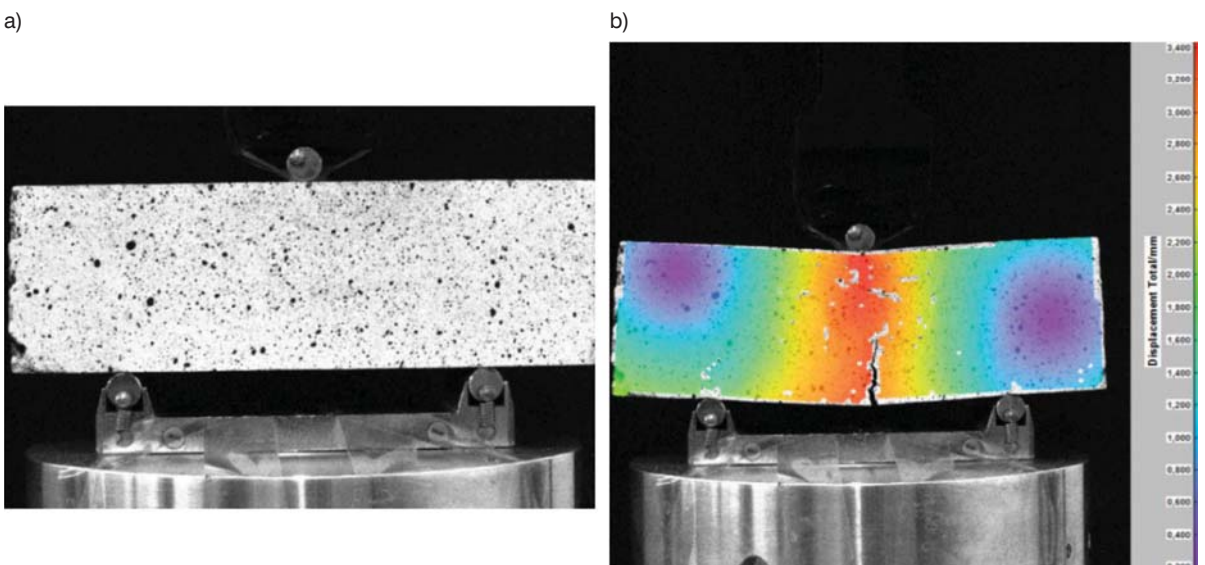
Rys. 3. Przykład badania próbki związanej spoiwem GPC (G – odpad gumowy, P – popiół lotny, C – cement): a) próbka przygotowana do badań, b) analiza wyników badania (mat. własne)

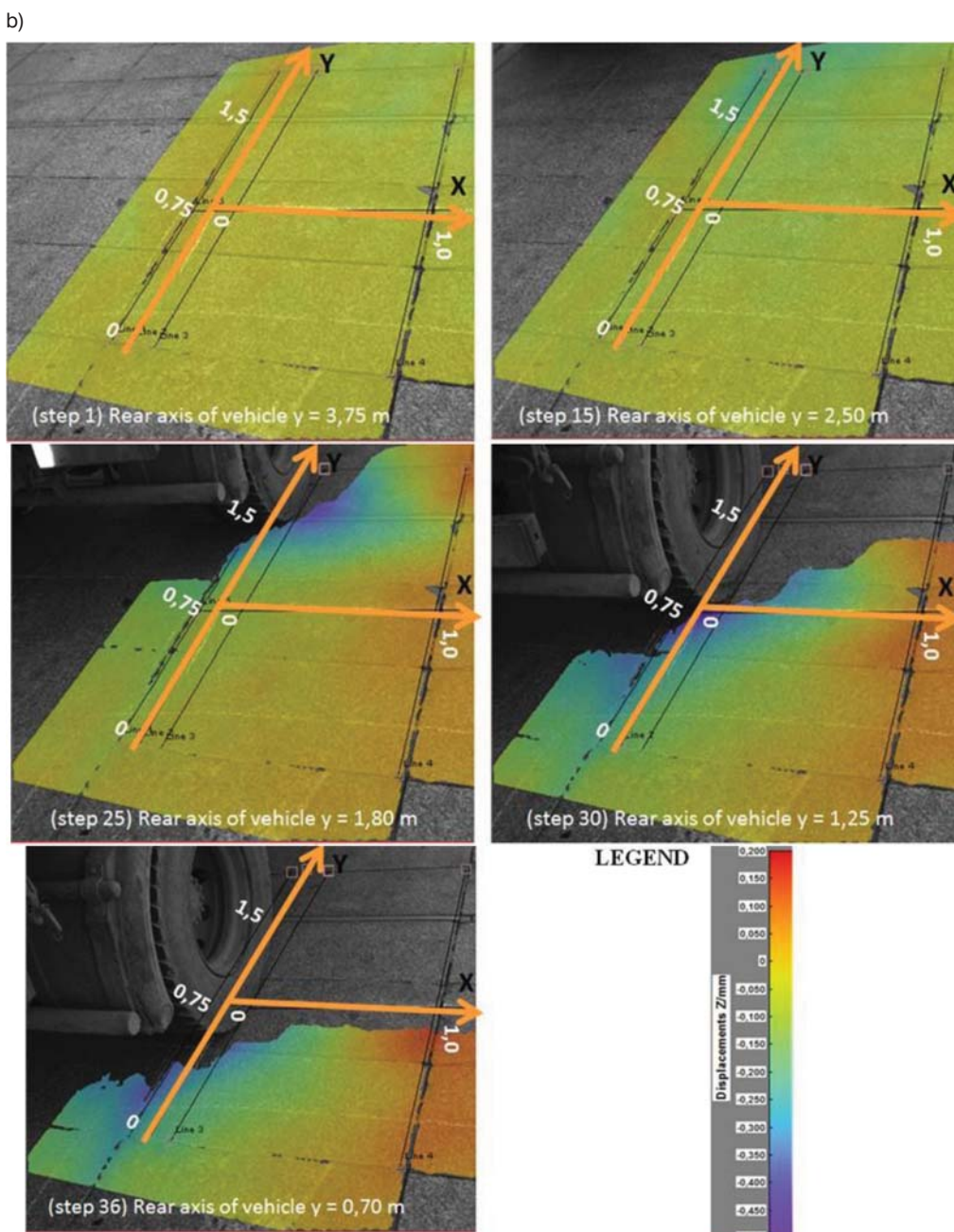
Rys. 4. Przykład badania próbki mieszanki mineralno-asfaltowej: a) przygotowana próbka umieszczona w aparacie do badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie, b) widok analizy badań z wykorzystaniem DIC [14]



Rys. 5. Przykład badania próbki siatki geosyntezy: a) próbka siatki zamocowana w przystawce do badania wytrzymałości na rozciąganie, b) obraz analizy danych uzyskanych z DIC [14]

Rys. 6. Przykład badania próbki kamiennej: a) próbka na stanowisku badawczym przygotowana do badania, b) przykładowy wynik analizy danych [14]





Rys. 7. Przykład badania nawierzchni z płyt kamiennych z wykorzystaniem cyfrowej korelacji obrazu: a) stanowisko do badań nawierzchni, b) przykładowe wyniki analiz dla kolejnych etapów badania [15]

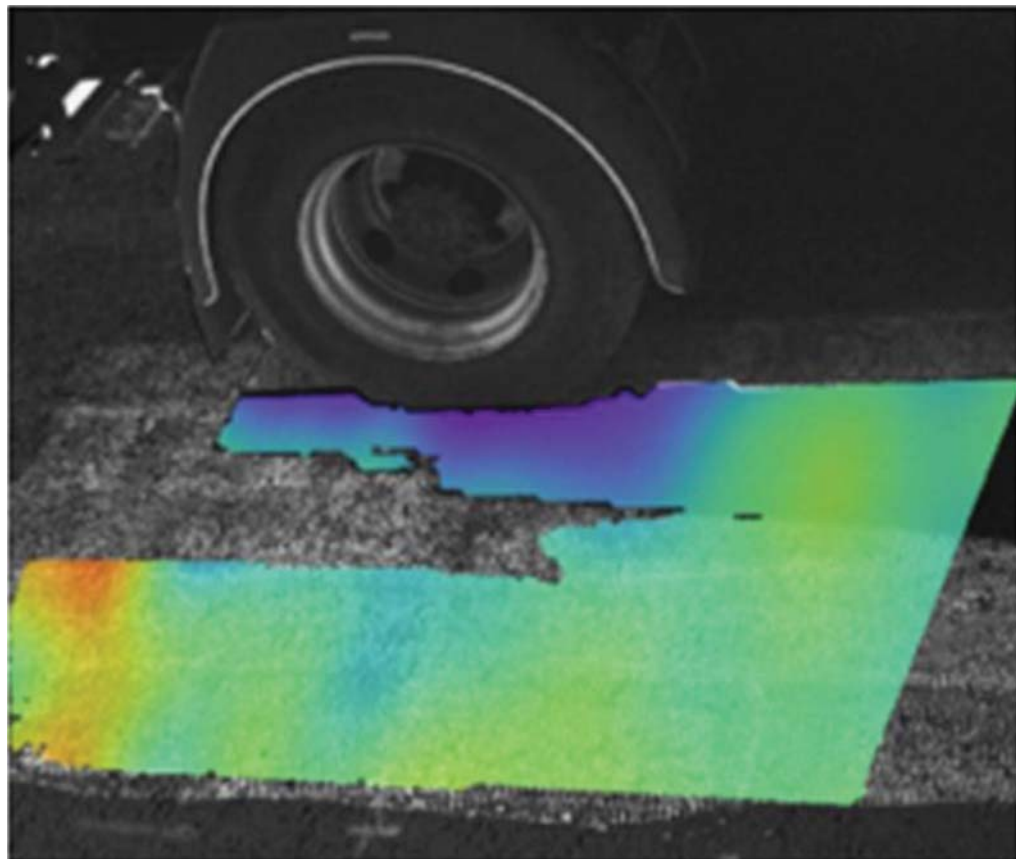
nia można identyfikować miejsca kumulowania się dużych naprężeń, których tradycyjnymi metodami badawczymi nie jesteśmy w stanie określić. Na rysunku 3 przedstawiono przykład badania materiałów związanych spoiwami. Mogą to być grunty, mieszanki z kruszyw naturalnych, łamanych czy też sztucznych. Na rysunku 3a zaprezentowano widok próbki przygotowanej do badań, natomiast na rysunku 3b jest przedstawiony przykład danych uzyskanych podczas badania jednoosiowego ściskania. W przeciwieństwie do standardowego badania wytrzymałości na ściskanie, przy wykorzystaniu DIC uzyskujemy również inne informacje, np. o miejscach kumulowania się naprężeń, rozkładzie naprężeń w próbce oraz o sposobie rozwoju spękań, które nie są widoczne gołym okiem.

Kolejnym przykładem możliwości badania materiałów drogowych jest badanie mieszanek mineralno-asfaltowych. Ze względu na konieczność zapewnienia widoczności próbki, nie wszystkie obecnie wykonywane badania mieszanki mineralno-asfaltowej MMA można rozszerzyć o cyfrową korelację obrazu. Wynika to z ograniczenia widoczności próbki podczas badań ze względu na konieczność np. zapewnienia podwyższonej temperatury badania. Jednakże część badań MMA jest wykonywana w temperaturze pokojowej, a konstrukcja sprzętu do badań umożliwia dodatkowe pomiary za pomocą DIC. Przykładem jest badanie wytrzymałości MMA na rozciąganie pośrednie, czy obecnie rzadziej wykonywane badanie stabilności według Marshalla. Na rysunku 4 przedstawiono próbkę MMA w trakcie badania z użyciem DIC oraz przykład danych opracowanych w dedykowanym oprogramowaniu.

Cyfrowa korelacja obrazu jest bardzo pomocna w badaniach materiałów geosyntetycznych (np. geosiatki, georuszty), stosowanych w budownictwie drogowym i geotechnicznym. Na rysunku 5 zaprezentowano możliwość badania siatki geosyntetycznej na rozciąganie, w którym dodatkowo wykorzystano cyfrową korelację obrazu. Wyniki analizy danych z wykorzystaniem DIC pozwalają określić nie tylko mechaniczną wytrzymałość na rozcią-

ganie badanej siatki, ale także mechanizm zniszczenia, jak również sposób przenoszenia obciążeń. Analiza uzyskanych danych pozwala na modyfikacje i rozwój takich materiałów, poprzez np. zmiany technologii produkcji w celu eliminowania słabych punktów w konstrukcji materiałów geosyntetycznych.

Z wykorzystaniem cyfrowej korelacji obrazu można także badać próbki materiałów kamiennych wykorzystywanych w drogownictwie lub gotowych wyrobów z nich zrobionych, np. krawężników, płyt itp. Badanie takie może być pomocne przy ocenie właściwości mechanicznych, w sytuacji kiedy jakaś partia materiału wykazuje wady. Badanie z wykorzystaniem DIC może wskazać przyczyny powstawania tych uszkodzeń. Na rysunku 6 przedstawiono próbkę kamienną poddaną badaniu wytrzymałości na zginanie na belce 3-punktowej.



Rys. 8. Przykład badania nawierzchni asfaltowej z wykorzystaniem cyfrowej korelacji obrazu [16]

Badania nawierzchni drogowych

Podjęmowane są także próby badania gotowych nawierzchni drogowych. Pionierem takich zastosowań cyfrowej korelacji obrazu w skali europejskiej i światowej, do badań istniejących nawierzchni jest dr inż. Marcin Grygierek, który podjął próby praktycznego wykorzystania tej metody do badań realizowanych w ramach własnych badań naukowych i eksperckich. Badania istniejących nawierzchni drogowych są bardziej skomplikowane w stosunku do badań laboratoryjnych, ze względu na zmienne warunki atmosferyczne, zmiany oświetlenia badanego obiektu oraz wymiary badanej powierzchni. W przypadku badań nawierzchni drogowej obowiązują te same zasady przygotowania powierzchni do badań, tj. należy na analizowaną powierzchnię nanieść ciemny gradient na jasnym tle. Gradient (ciemne punkty) jest niezbędny jako punkt odniesienia, aby można było interpretować otrzymane dane.

Na rysunku 7 zamieszczono przykład badania nawierzchni drogowej wykonanej z płyt kamiennych. W przedstawionym badaniu analizowano przyczyny powstawania wykruszeń spoin występujących w trakcie eksploatacji tej nawierzchni. Wykorzystanie cyfrowej korelacji obrazu pozwoliło w sposób jednoznaczny ustalić i udowodnić mechanizm powodujący tworzenie się takich uszkodzeń. Przy wykorzystaniu standardowych metod pomiarowych prawdopodobnie nie byłoby możliwości udowodnienia postawionej tezy.

Na kolejnym prezentowanym przykładzie przedstawiono badanie nawierzchni asfaltowej. Rysunek 8 zawiera wyniki

analizy danych przeprowadzonych w programie dedykowanym do cyfrowej korelacji obrazu. Badania takie pozwalają uzyskać dane na całej analizowanej powierzchni, a nie tylko w pojedynczych punktach, jak ma to miejsce w klasycznych metodach badań (VSS, belka Benkelmana czy FWD). Podczas jednego badania uzyskujemy dane w kierunku podłużnym, jak i poprzecznym, czego nie oferuje żadna z dotychczasowych metod badawczych. Również dokładność uzyskiwanych danych jest nieporównywalnie lepsza w stosunku do klasycznych badań. Stosowanie DIC w badaniach nawierzchni drogowych otwiera nowe możliwości diagnostyki nawierzchni drogowych.

Podsumowanie

Cyfrowa korelacja obrazu to nowoczesne narzędzie badawcze dające nowe możliwości określania właściwości materiałów przeznaczonych m.in. do budownictwa drogowego. Jest to metoda, która może uzupełnić dotychczasowe badania poprzez wzbogacenie uzyskanych wyników o nowe dane wcześniej niedostępne. Może to być także alternatywa dla obecnie wykorzystywanych narzędzi badawczych; np. dzięki DIC jest możliwe zastąpienie czujników tensometrycznych stosowanych w celu określania odkształceń materiałów budowlanych. Dodatkową zaletą cyfrowej korelacji obrazu jest wykonywanie pomiaru powierzchniowego, a nie tylko punktowego, jak to ma miejsce w przypadku wykorzystywania czujników tensometrycznych. Jak pokazano w artykule

podejmowane są próby wykorzystywania DIC do wykonywania badań nawierzchni drogowych. Badania takie dają dużo większy zakres uzyskania danych pomiarowych w stosunku do powszechnie stosowanych metod badawczych. Dalszy rozwój narzędzi do prowadzenia badań cyfrowej korelacji obrazu będzie dostarczał nowych możliwości, które będą mogły być wykorzystywane również w budownictwie drogowym.

Bibliografia

- [1] SUTTON M.A., ORTEU J.-J., SCHREIER H.W.: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements; Basic Concepts, Theory and Applications; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009.
- [2] PAN B.: Digital image correlation for surface deformation measurement: Historical developments, recent advances and future goals. *Meas. Sci. Technol.* 29, 2018.
- [3] MGUIL-TOUCHAL S., MORESTIN F., BRUNET M.: Various experimental applications of digital image correlation method. *Computer Methods and Experimental Measurements. Trans. Model. Simul.* 16, 45–58, 1997.
- [4] LU H., CARY P.D.: Deformation measurements by digital image correlation: Implementation of a second-order displacement gradient. *Exp. Mech.* 40, 393-400, 2000.
- [5] ZHANG D., AROLA D.D.: Applications of digital image correlation to biological tissues. *J. Biomed. Opt.* 9, 691-699, 2004.
- [6] VERHULP E., VAN RIETBERGEN B., HUISKES R. A: Three-dimensional digital image correlation technique for strain measurements in microstructures. *J. Biomech.* 37, 1313–1320, 2004.
- [7] PAN B., QIAN K., XIE H., ASUNDI A.: Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review. *Meas. Sci. Technol.* 20, 2009.
- [8] REU P.: The Art and application of DIC. Introduction to digital image correlation: Best practices and applications. *Exp. Tech.* 36, 3-4, 2012.
- [9] HILD F., ROUX S.: Comparison of local and global approaches to digital image correlation. *Exp. Mech.* 52, 1503-1519, 2012.
- [10] DROBIEC Ł., MAZUR W.: Wpływ nowego typu zbrojenia na nośność i rysoodporność ściskanych murów z ABK - badania strefy wokół okna. *Materiały budowlane.* 2022, Nr 4, 19-22, DOI 10.15199/33.2022.04.04
- [11] ZARRINPOUR M.R., CHAO S.-H.: Shear strength enhancement mechanisms of steel fiber-reinforced concrete slender beams. *ACI Struct. J.* 114, 729-742, 2017.
- [12] POOZESH P., BAQERSAD J., NIEZRECKI C., AVITABILE P., HARVEY E., YARALA R.: Large-area photogrammetry based testing of wind turbine blades. *Mech. Syst. Signal Process* 86, 98-115, 2017.
- [13] www.gom.com/pl
- [14] GÓRSZCZYK J., MALICKI K., ZYCH T.: Application of Digital Image Correlation (DIC) Method for Road Material Testing. *Materials*, 2019.
- [15] GRYGIEREK M., GRZESIK B., ROKITOWSKI P., RUSIN T.: Usage of digital image correlation in assessment of behavior of block element pavement structure, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 356, Resilient and Safe Road Infrastructure 8–9 May 2018, Kielce, 2018.
- [16] CIESIELCZUK E.: Identyfikacja parametrów modelu nawierzchni na podstawie pomiaru ugięć nawierzchni metodą cyfrowej korelacji obrazu oraz analizy wstecznej. Praca magisterska Politechniki Śląska, promotor Grygierek M., Gliwice, 2020.



67. Krynicka Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB odbędzie się w dniach 11–15 września 2022 roku, w Krakowie. Zaszczyci pełnienia funkcji bezpośredniego jej organizatora przypadł Wydziałowi Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej.

Tradycyjnie konferencja składać się będzie z dwóch części: problemowej i ogólnej. Myślą przewodnią części problemowej 67. edycji konferencji będzie *BIM / BLCM – modelowanie cyklu życia obiektu budowlanego*. Będzie ona poświęcona zagadnieniom przygotowania i eksploatacji modeli informacyjnych BIM, nie tylko do celów projektowych, jak to zazwyczaj ma miejsce, ale w kontekście wykorzystania potencjału BIM oraz docelowo BLCM (*Building Life Cycle Modeling*) w pełnym cyklu życia obiektu – w fazie jego definiowania, projektowania, realizacji i eksploatacji.

Przedmiotem części ogólnej konferencji są problemy naukowe z zakresu:

- Budownictwa ogólnego
- Fizyki budowli
- Geotechniki
- Inżynierii komunikacyjnej: mostowej i kolejowej
- Inżynierii materiałów budowlanych
- Inżynierii przedsięwzięć budowlanych
- Konstrukcji betonowych
- Konstrukcji metalowych
- Mechaniki konstrukcji i materiałów
- Budownictwa hydrotechnicznego

W ramach konferencji odbędą się zebrania: Komitetu Nauki PZITB, Sekcji Konstrukcji Metalowych, Sekcji Konstrukcji Betonowych, a także zebranie Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN.

Komitet Organizacyjny KK 2022
<http://www.krynica2022.pk.edu.pl/index.php/pl/>