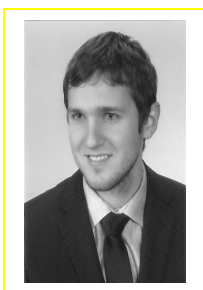


**Małgorzata KUJAWIŃSKA<sup>1</sup>, Bartłomiej SIWEK<sup>1</sup>, Grzegorz DYMNY<sup>1</sup>, Maciej RZECZKOWSKI<sup>2</sup>**<sup>1</sup>INSTYTUT MIKROMECHANIKI I FOTONIKI POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ, ul. Św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa<sup>2</sup>VIGO SYSTEM S.A., ul. Poznańska 129/133, 05-850 Ożarów Mazowiecki**Hybrydowy system równoczesnego pomiaru rozkładu temperatury oraz przemieszczeń obiektów inżynierskich****Prof. dr hab. Małgorzata KUJAWIŃSKA**

Kierownik Zakładu Inżynierii Fotonicznej w IMiF PW. Międzynarodowy ekspert w dziedzinie optyki stosowanej i fotoniki oraz zautomatyzowanych optycznych metod pomiarowych i ich zastosowań w mechanice, przemyśle, medycynie i multimediami. Fellow SPIE. Wiceprzewodnicząca Europejskiej Platformy Technologicznej Photonics21. Autor i współautor 2 monografii oraz ponad 200 artykułów. Koordynator polski 8 projektów europejskich i współkoordynator europejskiej Sieci Doskonałości w zakresie Mikrooptyki NEMO.

e-mail: [m.kujawinska@mchtr.pw.edu.pl](mailto:m.kujawinska@mchtr.pw.edu.pl)**Mgr inż. Bartłomiej SIWEK**

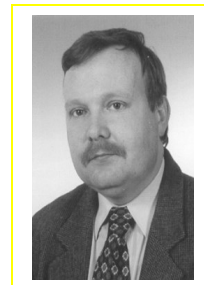
Absolwent Wydziału Mechatroniki PW (2011), założyciel firmy KSM Vision. Obszar zainteresowań: pomiary i monitorowanie obiektów inżynierskich z wykorzystaniem optycznych, polowych) metod pomiarowych, współautor 3 komunikatów konferencyjnych

e-mail: [b.siwek@mchtr.pw.edu.pl](mailto:b.siwek@mchtr.pw.edu.pl)

plane displacements of an object in a full-field of view (up to 2,5 m

**Mgr inż. Grzegorz DYMNY**

Absolwent Wydziału Mechatroniki PW, obecnie zatrudniony jako starszy specjalista w IMiF PW. Obszar zastosowań: budowa i zastosowania optycznych systemów pomiarowych, mechanika eksperymentalna. Współautor ponad 30 publikacji naukowych.

e-mail: [gdzto@mchtr.pw.edu.pl](mailto:gdzto@mchtr.pw.edu.pl)**Mgr inż. Maciej RZECZKOWSKI**

Absolwent Wydziału Mechatroniki PW. Od 2000 do dziś kierownik Wydziału Elektroniki VIGO System S.A. Odpowiedzialny za projektowanie, rozwój i produkcję urządzeń optoelektronicznych. Współautor projektów kamer termograficznych serii V-20, v50, v60.

e-mail: [mrzczkowski@vigo.com.pl](mailto:mrzczkowski@vigo.com.pl)**Streszczenie**

W artykule przedstawiono hybrydową eksperymentalno-numeryczną technikę przeznaczoną do pomiaru oraz monitorowania struktur inżynierskich. Technika bazuje na innowacyjnym połączeniu termowizji z metodą cyfrowej korelacji obrazu w wersjach 2D i 3D. Zaprezentowany system umożliwia jednoczesny pomiar i monitorowanie zmian obciążenia termicznego (rozkładu temperatur) oraz przemieszczeń w płaszczyźnie badanego obiektu w całym polu widzenia czujnika (do 2,5 m x 2,5 m). Przedstawiono zastosowania systemu na przykładzie monitorowania zmian pól przemieszczeń  $u(x,y)$  i  $v(x,y)$  i temperatury  $T(x,y)$  na powierzchni modelowej próbki (płyty z karbem) oraz w trakcie badań nowych materiałów izolacyjnych stosowanych w budownictwie.

**Słowa kluczowe:** metrologia optyczna, cyfrowa korelacja obrazu, termografia, Kamera IR-CKO, pola przemieszczeń, pola temperatury.

**A hybrid system for simultaneous measurements of temperature and displacement distributions of engineering objects****Abstract**

The techniques used for displacement/strain measurements and defect detection in civil engineering structures are based on a variety of physical phenomena, among which mechanical, optical, electrical and ultrasound methods prevail. Each of these methods has its unique properties. In the case of complex structures and structures exposed to a variety of environmental conditions the information gained from a combination of methods provides the best results. The most required measurands during structural health monitoring are in-plane and out-plane displacements which are directly related to strains. The best fitted method in this case is the digital image correlation method which may be used for global and local health monitoring of different structures. Also in many cases passive and active thermography is used for identification of thermal load distribution as well as assessing and monitoring the health of engineering structures, however the results are often difficult for quantitative interpretation. In the paper we focus on a novel concept of the hybrid experimental-numerical method for measurement and monitoring of engineering structures. The technique is based on an innovative combination of thermovision with 2D and 3D digital image correlation methods. The system presented enables simultaneous measurement and monitoring of thermal load (temperature distribution) and in-

x 2,5 m). The system functionality was demonstrated on an example of monitoring the displacement fields  $u(x,y)$  and  $v(x,y)$  as well as the temperature  $T(x,y)$  on the surface of a model sample with a notch and during investigations of novel insulating materials used in building engineering.

**Keywords:** optical metrology, digital image correlation, thermography, IR-DIC camera, displacement maps, temperature maps.

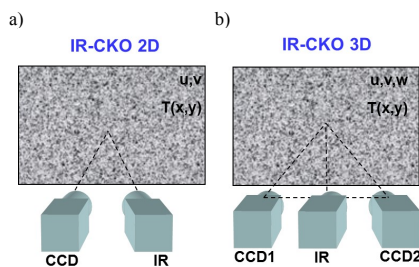
**1. Wstęp**

Informację o przemieszczeniach, odkształceniach oraz obecności defektów w konstrukcjach inżynierskich dostarczają różne systemy pomiarowe bazujące m.in. na analizie sygnału elektrycznego, magnetycznego, ultradźwiękowego lub optycznego. Każda z tych metod charakteryzuje się indywidualnymi właściwościami, które predestynują je dla różnych typów pomiarów oraz monitorowania stanu technicznego konstrukcji. W przypadku złożonych konstrukcji oraz konstrukcji narażonych na wpływ różnorodnych warunków środowiskowych najlepsze rezultaty badań otrzymuje się na podstawie analizy połączonych danych otrzymanych przy pomocy różnych systemów pomiarowych [1]. W badaniu oraz monitorowaniu stanu technicznego konstrukcji inżynierskich najbardziej użyteczne są informacje o zmianie rozkładu przemieszczeń w płaszczyźnie obiektu ( $u, v$ ) oraz pozapłaszczyznowych ( $w$ ), które są bezpośrednio powiązane z odkształceniami. Szeroki zakres dostępnych wizyjnych metod pomiarowych zarówno interferometrycznych jak i bazujących na oświetleniu niekoherentnym umożliwia pomiar przemieszczeń w całym polu widzenia detektora z czułością zależną od zastosowanej konfiguracji sprzętowej [2, 3]. W większości przypadków interferometryczne metody pomiarowe są zbyt czułe i mają zbyt mały zakres pomiarowy do zastosowań w monitorowaniu dużych konstrukcji inżynierskich. Najbardziej odpowiednią metodą przeznaczoną do badań takich obiektów jest cyfrowa korelacja obrazu, która umożliwia zarówno globalny jak i lokalny monitoring konstrukcji wielkogabarytowych [2]. W wielu przypadkach techniki termowizyjne, zarówno pasywne jak i aktywne umożliwiają identyfikację obciążenia termiczne-

go oraz pomiar rozkładu temperatury w badanej strukturze co ułatwia ocenę oraz monitorowanie stanu technicznego danej konstrukcji inżynierskiej [4]. W niniejszej pracy skupiono się na innowacyjnej koncepcji hybrydowego czujnika pomiarowego bazującego na termowizji (IR) oraz metodzie cyfrowej korelacji obrazu (CKO), umożliwiającemu jednocześnie badanie struktury z wykorzystaniem obu technik pomiarowych.

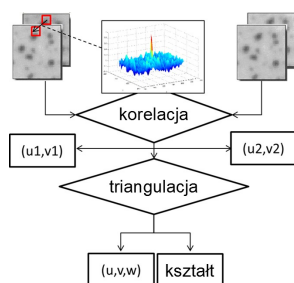
## 2. Budowa czujnika IR-CKO

Zaprezentowany system pomiarowy bazuje na dwóch podstawowych sensorach: kamerze wizyjnej wykorzystującej metodę cyfrowej korelacji obrazu oraz kamerze termowizyjnej. Można rozróżnić dwa warianty konfiguracyjne metody cyfrowej korelacji obrazu [5]. Pierwszy wariant to technika CKO 2D, w której system pomiarowy wykorzystuje pojedynczą kamerę video, która rejestruje sekwencję zdjęć badanego obiektu (rys. 1a). Zarejestrowane zdjęcia są dzielone na małe obszary o jednakowych rozmiarach (tzw. *subsety*), następnie algorytm CKO wyszukuje położenie danego *subsetu* na kolejnych zarejestrowanych obrazach względem położenia *subsetu* na pierwszym obrazie w serii (tzw. obrazu referencyjnego). W tym celu wyszukiwane są piki korelacyjne pomiędzy badanymi obszarami świadczące o ich największym podobieństwie (rys. 2). Na podstawie obliczonych wektorów przemieszczeń całkowitych dla poszczególnych *subsetów* wyznaczane są przemieszczenia składowe w kierunku  $u$  i  $v$  i budowane są mapy tych przemieszczeń. Drugi wariant to technika CKO 3D, w której system pomiarowy bazuje na zsynchronizowanym układzie dwóch kamer (rys. 1b), przy czym osie obu kamer są względem siebie pochylone. Obie kamery jednocześnie rejestrują zdjęcia tego samego pola pomiarowego, obejmującego badany obiekt. Na podstawie analizy zdjęć zarejestrowanych z jednej z kamer wyznaczane są mapy przemieszczeń w kierunku  $u$  i  $v$ , w sposób analogiczny jak dla metody CKO 2D. Informacje o przemieszczeniach poprzecznych ( $w$ ) oraz kształcie obiektu otrzymuje się na podstawie zależności triangulacyjnych (rys. 2) wyznaczanych z obrazów pobranych przez obydwie kamery [2,5]. Technika 3D CKO wymaga wcześniejszej kalibracji układu pomiarowego mającej na celu określenie zależności geometrycznych pomiędzy położeniami obu kamer.



Rys. 1. Schemat ogólny hybrydowego czujnika IR-CKO a) 2D oraz b) 3D  
Fig. 1. General scheme of the hybrid sensor IR-DIC: a) 2D and b) 3D

Oba warianty metody CKO umożliwiają badanie danej konstrukcji inżynierskiej w całym polu widzenia kamery zarówno przy zmianach obiektu w zakresie sprężystym jak i plastycznym.



Rys. 2. Schemat blokowy algorytmu cyfrowej korelacji obrazu  
Fig. 2. Block diagram of the digital image correlation algorithm

Zastosowanie kamery termowizyjnej umożliwia rejestrację map rozkładu emisyjności (termogramów) monitorowanej powierzchni badanego obiektu. Na podstawie analizy termogramów otrzymywana jest informacja m.in. o rozkładzie temperatury obiektu, wymuszeniu cieplnym oddziałującym na badany obszar, a także istotna, choć często niepełna, wiedza na temat integralności struktury (występowanie defektów, pęknięć, wtrąceń, itp.), jakości izolacji termicznej, zawilgoceniu oraz innych właściwości badanej konstrukcji [4].

Ogólny schemat hybrydowego czujnika IR-CKO zarówno w wariantach 2D jak i 3D [6] pokazano na rys. 1. Czujnik IR-CKO 2D zbudowany jest z kamery termowizyjnej (IR) oraz pojedynczej kamery video (CCD), natomiast system IR-CKO 3D wyposażony jest w dwie kamery video (CCD1 i CCD2) oraz kamerę termowizyjną (IR). W obu wariantach zarówno pojedyncza jak i obie kamery video rejestrują obrazy w polu widzenia obejmującym pole widzenia kamery termowizyjnej. W przypadku czujnika IR-CKO 3D kamera termowizyjna umieszczona jest centralnie pomiędzy kamerami video. Analizie podlega wspólny obszar zarejestrowany na zdjęciach oraz na termogramach.

Połączenie obu metod oraz uzyskanie najlepszych rezultatów wymaga zastosowania odpowiedniego scenariusza pomiarowego obejmującego:

- zarejestrowanie termogramów badanego obiektu,
- analizę termogramów w celu wyznaczenia obszarów o niejednorodnym rozkładzie emisyjności świadczących o możliwości występowania defektów w strukturze lub źródle zewnętrznego bądź wewnętrznego wymuszenia termicznego,
- modyfikacja powierzchni badanego obiektu (jeżeli jest potrzebna), która będzie badana poprzez naniesienie tekstury o losowym wzorze,
- pobranie serii obrazów video obiektu, przy jednoczesnym rejestrowaniu termogramów, podczas działania na obiekt naturalnego wymuszenia (temperatura, wiatr, przejeżdżające pojazdy itp.) lub wymuszenia kontrolowanego (ogrzewanie, obciążanie, itp.), a następnie wyznaczenie pól przemieszczeń metodą cyfrowej korelacji obrazu w trybie CKO 2D lub CKO 3D i ew. wyznaczenie numerycznych pól odkształceń
- interpretacja wyników złożonych z map przemieszczeń/ odkształceń oraz odpowiadających im termogramów, porównanie wyników z modelami numerycznymi.

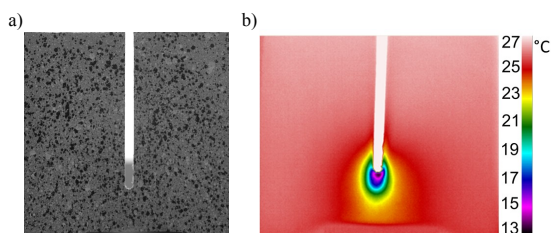
W wielu przypadkach (gdy badany obiekt jest quasi płaski i interesują nas tylko przemieszczenia w płaszczyźnie) wystarczające jest wykorzystanie prostszej techniki CKO 2D. Wówczas podczas badań można korzystać z kamery termowizyjnej z wbudowaną kamerą video o odpowiedniej rozdzielczości [6]. Kamera, która spełnia takie wymagania jest kamerą termowizyjną VIGOcam v60 [7]. Poniżej przedstawiono przykładowe zastosowania i wyniki pomiarów uzyskane na podstawie obrazów pobranych z wykorzystaniem tej kamery.

## 3. Przykładowe zastosowania

### Badanie materiałów

Badanym obiektem była płyta wykonana z tworzywa sztucznego (PCV) o wymiarach 200 mm x 200 mm x 5 mm. W płycie było wykonane nacięcie wzdłuż osi symetrii o wymiarach 150 mm x 10 mm zakończone promieniem R5. Ponieważ naturalna struktura tworzywa była jednolita niezbędne było naniesienie białym oraz czarnym sprayem struktury przypadkowych plamek na jednej stronie płyty co umożliwiło przeprowadzenie dokładnej analizy metodą cyfrowej korelacji obrazu. Dolna krawędź płyty była przymocowana do podłoża.

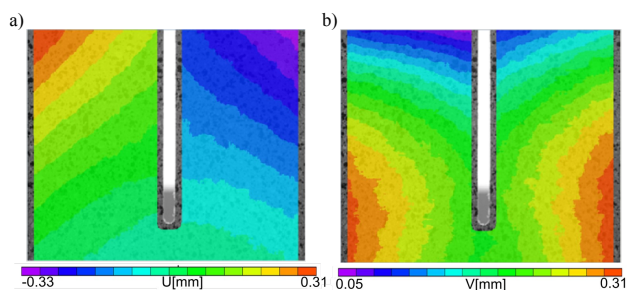
Doświadczenie miało na celu zbadanie zachowania obiektu na nagłe lokalne działanie niskiej temperatury. W tym celu schłodzono obszar karbu za pomocą sprayu chłodzącego FREEZE 65. Chłodzenie trwało około 15 sekund.



Rys. 3. Badany obiekt: a) jego zdjęcie z nałożoną teksturą plamkową i b) termogram badanego obiektu zarejestrowany podczas procesu chłodzenia płyty

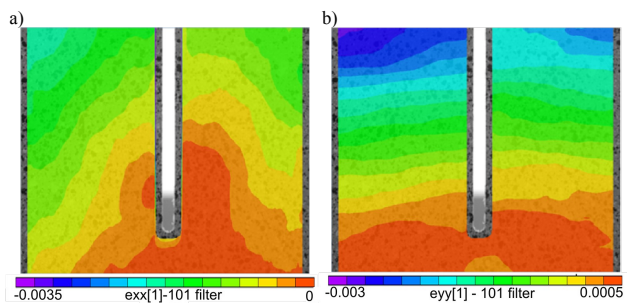
Fig. 3. Investigated object: a) its photo with the surface modified with stochastic texture and b) thermogram captured during the cooling process

Podczas pomiaru zarejestrowano serię zdjęć oraz termogramów obiektu w równomiernych odstępach czasowych (co 20 sekund), a następnie pierwszy z zarejestrowanych obrazów był porównywany z każdym kolejnym w celu wyznaczenia map rozkładu przemieszczeń  $u(x,y)$  i  $v(x,y)$  (rys. 5) oraz odkształceń  $\epsilon_x$  i  $\epsilon_y$  (rys. 6).



Rys. 5. Przykładowa mapa przemieszczeń w kierunku a)  $u(x,y)$  i b)  $v(x,y)$

Fig. 5. An example of the displacement map in a)  $u(x,y)$  and b)  $v(x,y)$



Rys. 6. Przykładowa mapa odkształceń a)  $\epsilon_x(x,y)$  i b)  $\epsilon_y(x,y)$

Fig. 6. An example of the strain map in a)  $\epsilon_x(x,y)$  and b)  $\epsilon_y(x,y)$

Analiza wyników umożliwia określenie wpływu działania niskiej temperatury na odkształcenia płyty. Poprzez równoległą analizę termogramów oraz map przemieszczeń i odkształceń możliwe jest także śledzenie wpływu rozkładu temperatury obiektu na jego odkształcenie.

### Badanie nowych materiałów izolacyjnych stosowanych w budownictwie

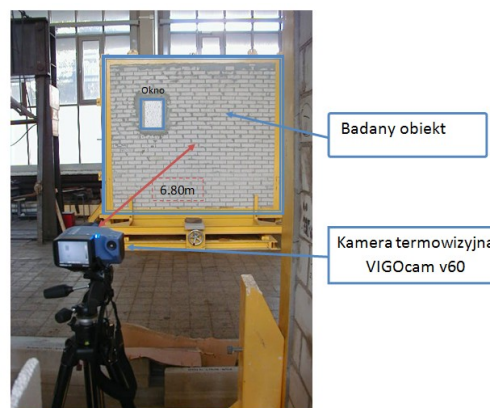
Badania zostały przeprowadzone w Instytucie Techniki Budowlanej w Warszawie. Badanym obiektem była ściana zbudowana z białej cegły (rys. 7), która z jednej strony pokryta była warstwą ocieplającą (styropian o grubości 50 mm oraz pokrywająca go warstwa tynku). W ścianie znajdowało się niewielkie prostokątne okno, które również było zasłonięte warstwą ocieplającą. Ściana znajdowała się w metalowej ramie, która pozwalała na umieszczenie jej w komorze do badań cieplno-wilgotnościowych układów ociepleniowych. Ściana znajdowała się w taki sposób, że strona pokryta warstwą ocieplającą znajdowała się wewnątrz komory,

natomiast na zewnątrz znajdowała się część zbudowana z samej cegły. Celem przeprowadzonych badań było zbadanie właściwości fizycznych nowego typu izolacji termicznej.

Ściana była poddawana działaniu okresowemu cyklowi ciepło-deszcz, który polegał kolejno na:

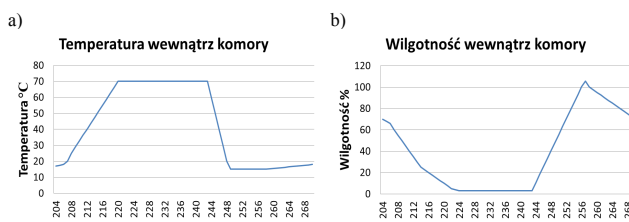
- Nagrzewaniu powietrza w komorze do temperatury  $70^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Wzrost temperatury następował w ciągu jednej godziny. Następnie przez dwie godziny w komorze utrzymywana była stała temperatura oraz wilgotność względna na poziomie 10-15%,
- Zraszaniu ściany wodą o temperaturze  $15^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$  przez jedną godzinę,
- Ociekaniu, dwugodzinny proces podczas, którego na badaną ścianę nie działało żadne wymuszenie,
- Osuszaniu, poddawanie ściany działaniu wysokiej temperatury trwające 10 minut.

Poniżej (rys. 8a i 8b) przedstawiono odpowiednio zmianę temperatury oraz wilgotności wewnątrz komory w funkcji numeru pliku pomiarowego. Przeprowadzone badania objęły pojedynczy cykl zmian. Podczas pomiarów zarejestrowano termogramy oraz obrazy wizyjne zewnętrznej części badanej ściany. Układ pomiarowy oraz obiekt badań przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Obiekt badań (ściana) i układ pomiarowy

Fig. 7. Object with the investigated area and the measuring system



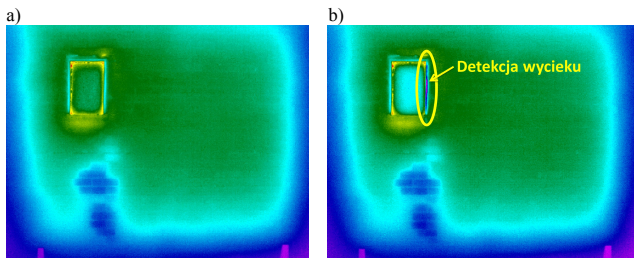
Rys. 8. Zmiana a) temperatury, b) wilgotności, wewnątrz komory

Fig. 8. a) Temperature and b) moisture change inside the chamber

Tekstura badanego obiektu w postaci muru z białej cegły była wystarczająca do przeprowadzenia pomiaru metodą CKO 2D, więc żadne dodatkowe modyfikacje obserwowanej struktury nie były konieczne.

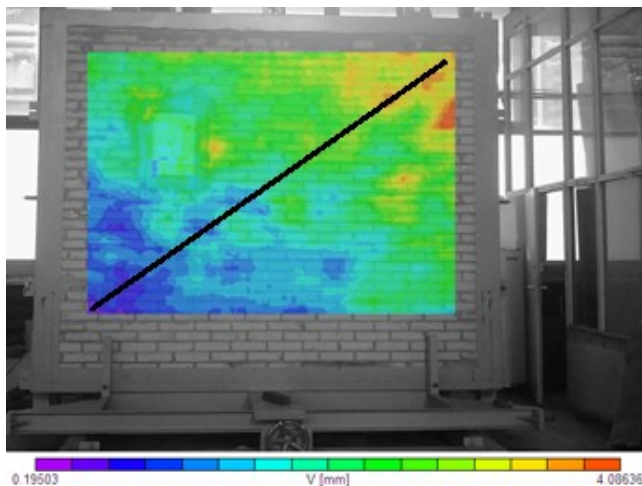
Podczas badania zarejestrowano serię zdjęć oraz termogramów obiektu w równomiernych odstępach czasowych (co 5 min). Na podstawie zarejestrowanych zdjęć wyznaczono rozkłady map przemieszczeń w kierunku poziomym  $u(x,y)$  oraz pionowym  $v(x,y)$ .

Analiza zarejestrowanych termogramów (rys. 9.) umożliwiła wykrycie obszaru, w którym wystąpiło zawilgocenie ściany (ciemniejszy obszar termogramu poniżej okna na rys. 9a.). Zawilgocenie może świadczyć o nieszczelności powłoki ocieplającej. Szczegółowa analiza kolejnych termogramów umożliwiła również detekcję nieszczelności w okolicy otworu okiennego (obszar zaznaczony elipsą na rys. 9b.), która pojawiła się podczas procesu zraszania.



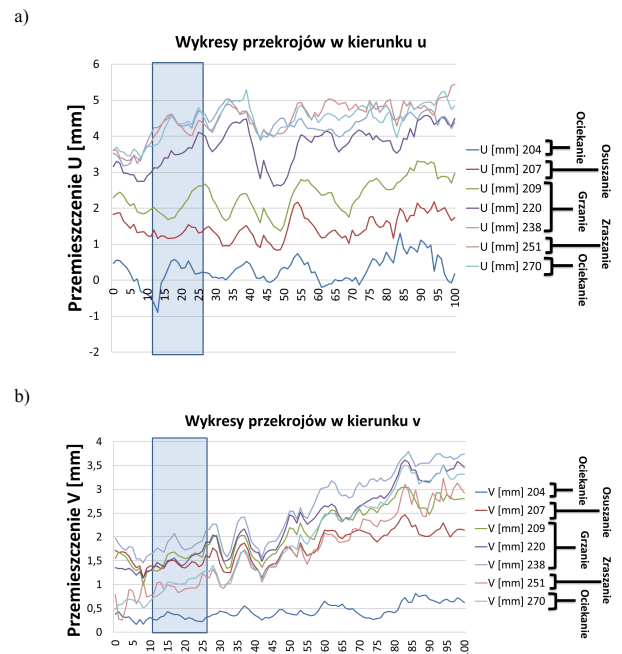
Rys. 9. Termogram zarejestrowany podczas zraszania, a) brak przecieku, b) pojawienie się przecieku  
Fig. 9. Thermogram captured during the sprinkle process, a) no leakage, b) appearance of leakage

Mapy rozkładu przemieszczeń przeanalizowano zarówno w kierunku poziomym  $u(x,y)$  jak i pionowym  $v(x,y)$ . Na podstawie obserwacji poszczególnych pól przemieszczeń wyznaczono przekrój wzdłuż linii z najbardziej interesującym rozkładem przemieszczeń w obu kierunkach (rys. 10.). Następnie wyeksportowano dane wzdłuż tego przekroju dla kilku map rozkładu przemieszczeń zarejestrowanych w różnych momentach trwania cyklu ciepło-deszcz. Otrzymane w ten sposób wyniki przedstawiono na rys. 11. Szczegółowa analiza linii przekroju w obu kierunkach (rys. 11a i 11b) pozwala stwierdzić, że na rozkład pól przemieszczeń większy wpływ ma zmiana temperatury wewnątrz komory klimatycznej aniżeli zmiana panującej wilgotności, chociaż lokalnie szczególnie na granicy obszarów o wysokiej i niskiej wilgotności widoczna jest zależność pomiędzy stanem wilgotności badanej struktury, a uzyskiwanymi mapami przemieszczeń.



Rys. 10. Przykładowa mapa rozkładu przemieszczeń w kierunku  $v(x,y)$  z naniesioną linią przekroju  
Fig. 10. Exemplary map of  $v(x,y)$  displacement map with a line of the cross-section

Analiza map i przekrojów map przemieszczeń  $u(x,y)$  i  $v(x,y)$  pozwala zauważyć pojawienie się członów liniowych przemieszczeń odpowiednio w kierunku  $x$  i  $y$ . Występowanie tych członów liniowych może być związane z wadliwą konstrukcją ściany lub jej nieprawidłowym zamocowaniem w komorze badawczej. Lewa dolna część ściany była zamocowana poprawnie, natomiast w górnej części po prawej stronie w zamocowaniu występował luz, czego efektem były m.in. większe wartości przemieszczeń w tym obszarze. Analiza termograficzna nie wykazała obecności dodatkowego wymuszenia cieplnego, które mogłoby być przyczyną takiego rozkładu przemieszczeń (rys. 9.). Ilość informacji dostępnych w wyniku zintegrowanych pomiarów i monitorowania obiektu jest ogromna ( $u(x,y,t), v(x,y,t), T(x,y,t)$ ) i w zależności od potrzeby może być wykorzystana do analizy przestrzenno-czasowej dowolnego fragmentu obiektu.



Rys. 11. Wykresy przekrojów map przemieszczeń a)  $u(x,y)$ , b)  $v(x,y)$ . Na niebiesko zaznaczono zawilgocony obszar ściany  
Fig. 11. Graphs of the cross-section of a)  $u(x,y)$  and b)  $v(x,y)$  displacement maps. Blue marked area shows a humid part of the investigated wall

#### 4. Wnioski

Prezentowany w artykule hybrydowy system pomiarowy IR-CKO integrujący dwie połowe metody pomiarowe umożliwia uzyskanie znacznie większej ilości informacji na temat stanu technicznego badanej struktury inżynierskiej oraz pozwala w wielu przypadkach na lepszą interpretację otrzymanych wyników. Kamera termowizyjna VIGOcam v60 z wbudowanym detektorem wizyjnym pozwala pozyskać dane do równoczesnych pomiarów przemieszczeń w płaszczyźnie obiektu i rozkładu temperatury na jego powierzchni. Dodatkowe pomiary kształtu i przemieszczeń pozapłaszczyznowych wymagają konfiguracji kamery termowizyjnej z dwiema kamerami video.

Badania realizowane były w projekcie MONIT finansowanym ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

#### 5. Literatura

- [1] Kujawińska M. i in.: Remote online monitoring and measuring system for civil engineering structures. Proc. SPIE, v. 7389, 738904-1-10, 2009.
- [2] Kujawińska M. i in.: Hierarchical, multitasks optical system for health monitoring of civil engineering structures. Proc. SPIE, v. 7387, 738721, 2010.
- [3] <http://www.monit.pw.edu.pl>
- [4] Więcek B., De Mey G.: Termowizja w Podczerwieni. Podstawy i zastosowania. Wydawnictwo PAK, Warszawa 2011.
- [5] Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H.W.: Image correlation for shape, motion and deformation measurements. Basic concepts, theory and applications. Springer, New York 2008.
- [6] Kujawińska M., Bukalska M., Dymny G.: Hybrid digital image correlation/thermovision system for monitoring of civil engineering structures. Quirt 10, 10th International conference on Quantitative Infrared Thermography, 173-177, Quebec, Kanada 2010.
- [7] <http://vigo.com.pl>