

# XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2024

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

### Cyfrowa korelacja obrazów w badaniach eksperymentalnych elementów o małych rozmiarach

Grzegorz Kokot<sup>1</sup>, Tomasz Rusin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Katedra Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Politechnika Śląska

<sup>2</sup>Dantec Dynamics GmbH, Ulm, Germany

email: grzegorz.kokot@polsl.pl, tr@dantecdynamics.com

**STRESZCZENIE:** Praca przedstawia zastosowania metody cyfrowej korelacji obrazów (Digital Image Correlation – DIC) w badaniach mechanicznych elementów o małych bądź bardzo małych rozmiarach. Przedstawiono możliwości pomiarowe w skali makro oraz w skali mikro. Zaprezentowano wyniki badań własnych wraz z opracowanymi stanowiskami pomiarowymi umożliwiającymi pomiary przemieszczeń i analizę pól odkształceń na elementach o małych rozmiarach. Przedstawiono również zastosowanie metody pomiarowej wykorzystującej mikroskop stereoskopowy w zakresie określania stanu deformacji obiektów o mikro rozmiarach oraz możliwości walidacji modeli numerycznych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** Badania eksperymentalne, mikroskala, mikroelementy, microDIC, mikro cyfrowa korelacja obrazów

#### 1. Wprowadzenie

Badania eksperymentalne elementów o rozmiarach poniżej kilku (< 5 mm) lub kilkunastu milimetrów stają się coraz powszechniejsze ze względu na postępującą miniaturyzację urządzeń. Badania takie są jednak trudne głównie ze względu na małe wymiary próbek i wynikające z tego trudności w pomiarze przemieszczeń i odkształceń. Dotyczy to zarówno badań mechanicznych prowadzonych w celu wyznaczenia własności materiałowych jak i badań prowadzonych w celu określenia własności użytkowych elementów pod działaniem obciążeń. Podstawowe wielkości mierzone w trakcie badań mechanicznych to siła i przemieszczenie. W celu zapewnienia odpowiedniej precyzji i dokładności pomiaru w skali makro do pomiaru sił wykorzystywane są głowice sił stanowiące jeden z elementów wyposażenia uniwersalnych maszyn wytrzymałościowych natomiast do pomiaru przemieszczeń powszechnie stosuje się ekstensometry bądź tensometry. Takie podejście dobrze sprawdza się w przypadku obiektów o rozmiarach powyżej 25 mm (typowa baza pomiarowa ekstensometru). W przypadku elementów o rozmiarach mniejszych pojawiają się problemy związane przede wszystkim z mocowaniem oprzyrządowania pomiarowego. Tutaj pomocne stają się bezkontaktowe techniki optyczne takie jak cyfrowa korelacja obrazów, elektronika interferometria plamkowa, techniki laserowe [1].

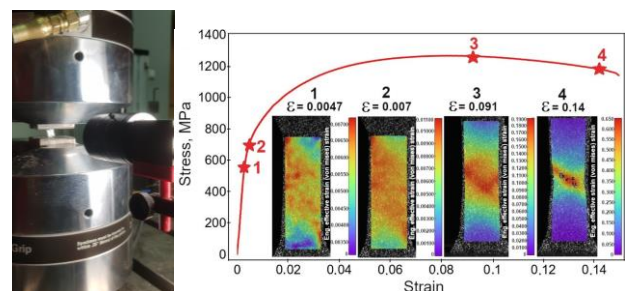
#### 2. Cyfrowa korelacja obrazów DIC

Wśród rozwijających się nowoczesnych metod optycznych, pozwalających na bezstykowe testy w obszarze badań mechanicznych, wyróżnia się metoda cyfrowej korelacji obrazów (Digital Image Correlation – DIC) [2]. Jest to bezkontaktowa technika pomiarów przemieszczeń i odkształceń w czasie rzeczywistym, oparta na korelacji obrazów

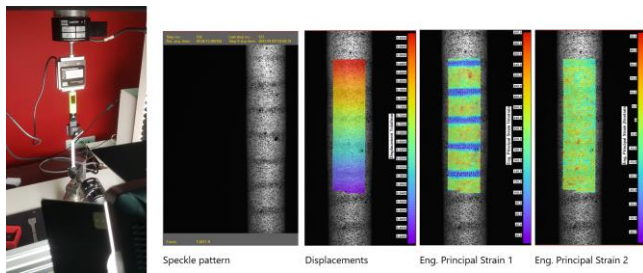
wysokiej rozdzielczości wykonanych w trakcie obciążania elementu badanego systemem wysokorozdzielczych kamer.

Metoda pozwala na doświadczalne określenie stanu deformacji i odkształcenia dla dowolnego stanu obciążenia, zarówno w przypadku obciążeń statycznych, jak i dynamicznych, gdzie obciążenia mogą być realizowane na drodze oddziaływań mechanicznych, a także w inny sposób.

Typowy zestaw pomiarowy wykorzystujący technikę DIC w badaniach w skali makro przedstawiono na rys.1. Maszyna wytrzymałościowa wyposażona w system cyfrowej korelacji obrazów (np. DIC Q400 firmy Dantec Dynamic) daje szeroki zakres możliwości, gdzie pole przemieszczeń jest określane w sposób bezstykowy. Jako przykład na rys. 1 przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych nowo opracowywanych stali wielofazowych QP [3], gdzie istotne są zjawiska w zakresie uplastycznienia. Na rys. 2 przedstawiono badania własności mechanicznych dla fragmentu sztucznej tętnicy. Ze względu na rozmiary lub materiał wykorzystanie typowego ekstensometru jest praktycznie niemożliwe.



Rys. 1. System DIC w badaniach stali wielofazowych typu QP



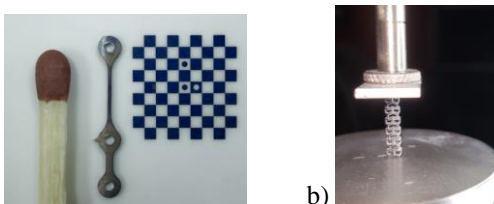
a) b)  
Rys. 2. Stanowisko pomiarowe z systemem cyfrowej korelacji obrazów (a) oraz zmierzone pola przemieszczeń i odkształceń na próbce (sztuczna tętnica firmy GORE, materiał ePTFE)

### 3. Cyfrowa korelacja obrazów w skali mikro – $\mu$ DIC

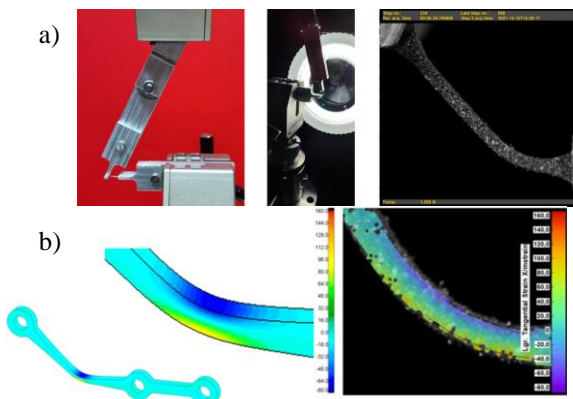
W ramach prowadzonych badań nad możliwością wykorzystania systemu DIC do zastosowań w skali mikro opracowano stanowiska badawcze wyposażone w stereoskopowy mikroskop (rys. 2). Jako przykłady możliwości badawczych na rys. 3 przedstawiono dwie mikropróbkę poddane badaniom mechanicznym. Na rys. 2 oraz rys. 3 przedstawiono testowanie elementu mikromechanizmu, na rys. 4 przedstawiono badania stentu bioresorbowalnego wraz z odpowiadającymi wynikami uzyskanymi na drodze symulacji numerycznych [4].



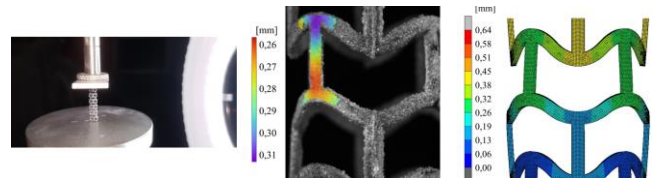
Rys. 3. Stanowiska pomiarowe z systemem cyfrowej korelacji obrazów do testów mikropróbek



Rys. 4. Mikropróbkę: a) element mikromechanizmu, b) biodegradowalny stent wieńcowy



Rys. 5. Próba zginania mikroelementu: a) symulacja numeryczna, b) badanie eksperymentalne z mikroDIC



Rys. 6. Próba ściskania stentu, pole przemieszczeń uzyskane w badaniu eksperymentalnym oraz w symulacji numerycznej

### 4. Podsumowanie

Cyfrowa korelacja obrazów jest techniką optyczną pomiaru przemieszczeń i odkształceń zdobywającą coraz szersze zastosowania w obszarze badań mechanicznych. Szczególny sposób prezentacji wyników w postaci barwnych map przemieszczeń i odkształceń rozszerza przydatność tej metody ze względu na bezpośrednie możliwości weryfikacji i walidacji modeli numerycznych czy wyników symulacji numerycznych uzyskiwanych metodą elementów skończonych. Rozszerzenie możliwości pomiarowych do skali mikro poprzez zastosowanie mikroskopu stereoskopowego zwiększa obszar zastosowań w badaniach mechanicznych mikropróbek czy też mikroukładów. Przeprowadzone badania i testy wykazują dużą efektywność takiego podejścia. Niewątpliwie bezstykowy charakter pomiaru również znacząco rozszerza obszar badawczy z punktu widzenia testowanych materiałów. Wyniki badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych potwierdzają, że system zbudowany z maszyny wytrzymałościowej i mikroskopu optycznego może być z powodzeniem zastosowany do pomiaru odkształceń i właściwości mechanicznych próbek o wymiarach z zakresu skali mikro. Prowadzone prace przewidują rozszerzenie techniki badawczej o wykorzystaniu podwójnego układu mikroskopów co pozwoli wyznaczać jednocześnie pola przemieszczeń i odkształceń w dwóch naprzeciwległych płaszczyznach. Metoda pomiarowa znajduje zastosowanie szczególnie w badaniach materiałów nietypowych (m.in. tkanki kostne, tkanki miękkie, kompozyty, stale wielofazowe) wspomagając prowadzone badania naukowe w zakresie biomechaniki, mechaniki kompozytów czy inżynierii materiałowej z powodzeniem uzupełniając klasyczne metody pomiarów.

*Praca została wykonana w ramach środków statutowych Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej.*

### Literatura

- [1] P. K. Rastogi i E. Hack, *Optical Methods for Solid Mechanics: A Full-Field Approach*. John Wiley & Sons, 2013.
- [2] H. Schreier, J.-J. Orteu, i M. A. Sutton, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*. Boston, MA: Springer US, 2009. doi: 10.1007/978-0-387-78747-3.
- [3] Aleksandra Kozłowska, Grzegorz Kokot, Krzysztof Matus, Adam Grajcar: Monitoring the phase evolution and fracture behavior of advanced multiphase QP steel using EBSD technique and digital image correlation, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 133, Part A, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104520>.
- [4] Mołęda N, Kokot G, Kuś W, Sobota M, Włodarczyk J, Stojko M. Two-Step Geometry Design Method, Numerical Simulations and Experimental Studies of Bioresorbable Stents. *Materials*. 2022; 15(7):2385. <https://doi.org/10.3390/ma15072385>