

# Zastosowanie metody Stereo PIV do badania przemieszczeń wywołanych działaniem sił aerodynamicznych

WALDEMAR WODZIAK<sup>ID</sup>, JACEK SOBCZYK<sup>ID</sup>

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków*

## Streszczenie

W artykule przedstawiono pomiary deformacji ciała stałego będącego pod wpływem sił aerodynamicznych przy użyciu metody Stereo PIV. Jako obiekt badań wybrano fragment modelu płata lotniczego wykonanego w skali 1:72. Pomiary wykonano dla dwóch kątów natarcia oraz dwóch prędkości napływu, dla których wyznaczono kontury oraz rozkłady składowych przemieszczeń.

**Słowa kluczowe:** Stereo Particle Image Velocimetry, deformacja, płat lotniczy, przemieszczenie

## 1. Wprowadzenie

Metody optyczne wykorzystywane są szeroko do pomiarów zarówno w mechanice ciała stałego jak i mechanice płynów. Klasyczne przyrządy pomiarowe takie jak tensometry pozwalają na punktowy pomiar odkształcenia. Wyższą rozdzielczość przestrzenną otrzymujemy się poprzez użycie metod optycznych takich jak interferometria holograficzna, plamkowa, Moire'a czy też cyfrowa korelacja obrazu.

Metodę cyfrowej korelacji obrazu (z ang. *Digital Image Correlation* – DIC) z powodzeniem zastosowano do badania odkształceń próbek skał w teście jednoosiowego ściskania wykonanych przez pracowników IMG PAN [Nowakowski i in., 2013]. Metoda DIC polega na oświetlaniu badanego obszaru pomiarowego i analizie intensywności światła odbitego od powierzchni w stanie przed oraz po przyłożeniu obciążenia po którym następuje deformacja [Kowalewski i in., 2016]. Na badanej powierzchni niezdeformowanej nanosi się punkty referencyjne (znaczniki), które zmieniają położenie w trakcie trwania obciążenia. Następnie przemieszczenia tych punktów obliczane są metodami korelacyjnymi. Stosując metodę DIC można uzyskać dwu (jedna kamera) lub trójwymiarowe (dwie kamery) pole przemieszczeń oraz odkształceń.

Na podobnej zasadzie jak w metodzie DIC odkształcenia można obliczyć przy użyciu metody Stereo PIV (*Particle Image Velocimetry*), która służy do wyznaczania wektora prędkości przepływu. Wykonując pomiary odkształceń nie wprowadza się do badanego obszaru posiewu tylko podobnie jak w metodzie DIC należy odpowiednio przygotować badaną powierzchnię, umieszczając na niej stochastycznie rozłożone punkty. W metodzie Stereo PIV wykorzystywane są również inne algorytmy obliczeniowe, niż w metodzie DIC.

## 2. Metoda Stereo PIV

W podstawowej metodzie PIV wyznaczane są dwie składowe wektora prędkości. Metoda Stereo PIV oparta jest na tej samej zasadzie, na jakiej ludzkie oko widzi otaczający nas świat. Każde z naszych oczu osobno rejestruje inny obraz. Mózg porównując te obrazy ze sobą tworzy trójwymiarową rekonstrukcję obrazu. W metodzie Stereo PIV kamery pełnią funkcję oczów. Osie optyczne kamery ustawione są pod kątem do obiektu, w związku z czym pojawia się zniekształcenie. Aby zniwelować to zniekształcenie stosuje się moduł Scheimpfluga, które zadaniem takie skrócenie osi optycznej, aby uzyskać odpowiednio ostry obraz.

Wadą takiego rozwiązania jest duży błąd perspektywy, zmniejszany poprzez zastosowanie funkcji mapującej, która transformuje układ współrzędnych wyrażony w pikselach na rzeczywisty [Raffel i in., 2018].

Mając obraz z dwóch kamer możemy zapisać następujące równania opisujące przemieszczenie  $d_X$  oraz  $d_Y$  znaczników na zdjęciu:

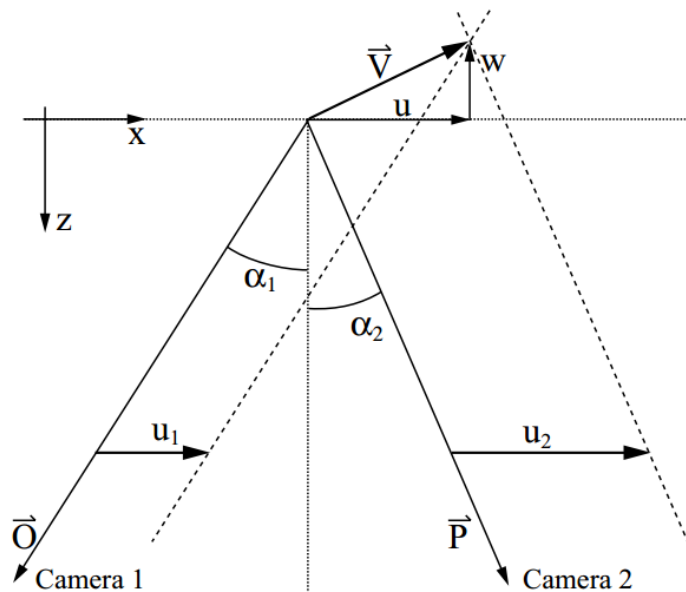
$$d_X = x'_i - x_i = -M \cdot \left( D_X + D_Z \cdot \frac{x'_i}{z_0} \right)$$

$$d_Y = y'_i - y_i = -M \cdot \left( D_Y + D_Z \cdot \frac{y'_i}{z_0} \right)$$

gdzie:

- $M$  – powiększenie,
- $D_x, D_y, D_z$  – rzeczywiste przemieszczenie znaczników,
- $x_i, y_i$  – położenie cząstek znacznikowych na pierwszym zdjęciu,
- $x'_i, y'_i$  – położenie cząstek znacznikowych na drugim zdjęciu,
- $z_0$  – odległość pomiędzy matrycą kamery a soczewką.

Oznaczmy jako  $\alpha$  kąt leżący na płaszczyźnie XZ pomiędzy osią Z a osią optyczną kamery O. Analogicznie  $\beta$  oznacza kąt na płaszczyźnie YZ (Rys. 1).



Rys. 1. Geometria osi optycznych na płaszczyźnie XZ [Raffel i in., 2018]

$$\tan \alpha = \frac{x'_i}{z_0}$$

$$\tan \beta = \frac{y'_i}{z_0}$$

Zmierzone wartości składowych  $U$  oraz  $V$  wektora prędkości pierwszej kamery wynoszą:

$$U_1 = -\frac{x'_i - x_i}{M\Delta t}$$

$$V_1 = -\frac{y'_i - y_i}{M\Delta t}$$

Analogicznie można wyznaczyć składowe  $U$  oraz  $V$  dla drugiej kamery. Korzystając z powyższych równania można zrekonstruować trzy składowe wektora prędkości za pomocą wzorów:

$$U = \frac{U_1 \tan \alpha_2 + U_2 \tan \alpha_1}{\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2}$$

$$V = \frac{V_1 \tan \beta_2 + V_2 \tan \beta_1}{\tan \beta_1 + \tan \beta_2}$$

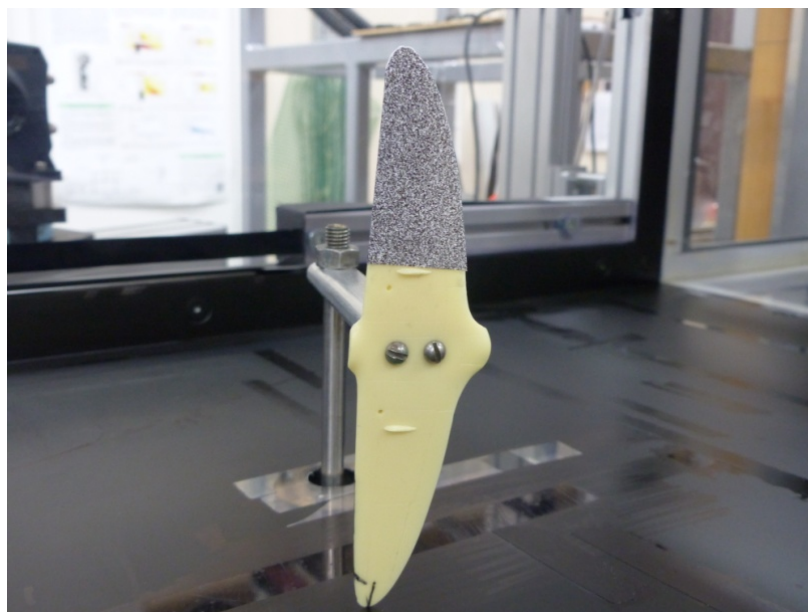
$$W = \frac{U_1 - U_2}{\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2} = \frac{V_1 - V_2}{\tan \beta_1 + \tan \beta_2}$$

Za pomocą metody PIV mierzymy prędkość. Aby otrzymać przemieszczenie należy pomnożyć prędkość przez czas pomiędzy dwoma zdjęciami.

### 3. Stanowisko pomiarowe

Jako obiekt badań wybrano płat lotniczy o profilu NACA pochodzący z modelu samolotu P.Z.L P 45 „Sokół”. Samolot został zaprojektowany i testowany w latach 30 XX wieku przez Kazimierza Korsaka. Prace nad wdrożeniem samolotu do użytku wojskowego przerwał wybuch II Wojny Światowej. PZL.45 Sokół był projektem lekkiego myśliwca o konstrukcji całkowicie metalowej, w układzie dolnopłata, z podwoziem stałym. Napęd zapewniał pojedynczy silnik Gnome-Rhone Mars 14M05 o mocy maksymalnej 760 KM. Uzbrojenie miały stanowić 4 karabiny maszynowe PWU wz.36 kal. 7,92 mm. Parametry techniczne samolotu: rozpiętość skrzydeł 12.14 m, długość 7.88 m, wysokość 2.55 m, waga pustego samolot 1107 kg, waga maksymalna 12940 kg, prędkość maksymalna 520 km/h. Do badań użyto fragmentu płata lotniczego z tworzywa sztucznego pochodzącego z modelu wykonanego skali 1:72. Obwiednia płata charakteryzuje się profilem NACA.

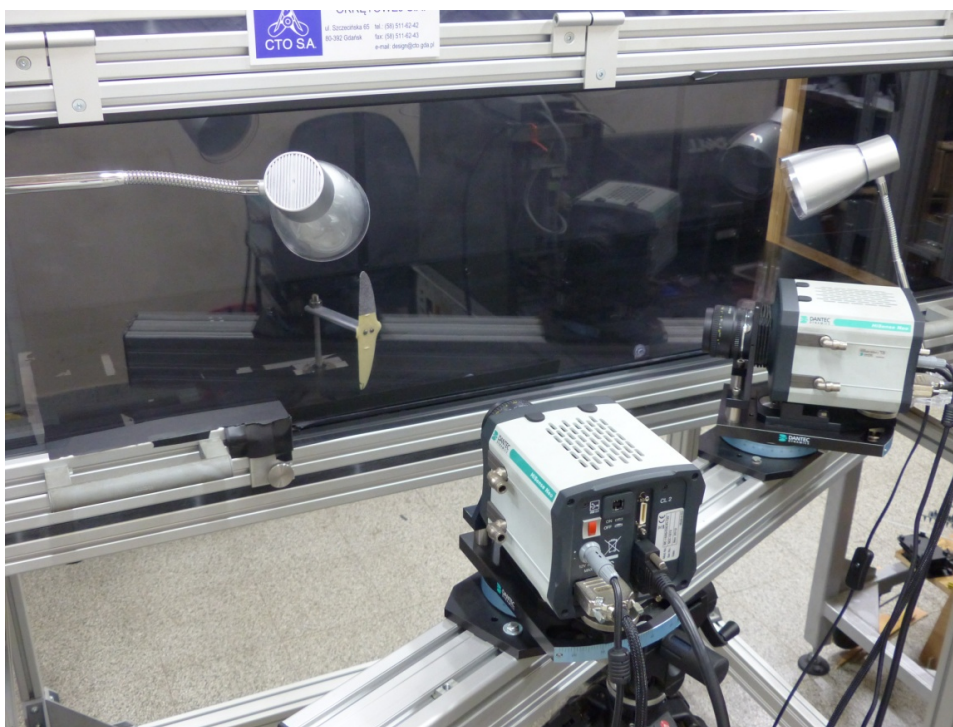
Płat został zamocowany na specjalnej konstrukcji, którą umieszczono w tunelu aerodynamicznym (Fot. 1).



Fot. 1. Model płata zamocowany w tunelu aerodynamicznym

Pomiar trzech składowych wektora przemieszczeń przebiegał następująco. Przed kalibracją układu pomiarowego wykonano testy znaczników, które polegały na dopasowaniu stochastycznie ułożonych czarnych kropek na białym tle do możliwości rejestrowania ich przemieszczeń przez kamery sCmos. Po wybraniu odpowiedniego wzoru przystąpiono do kalibracji układu pomiarowego. Kamery zestawiono w taki sposób,

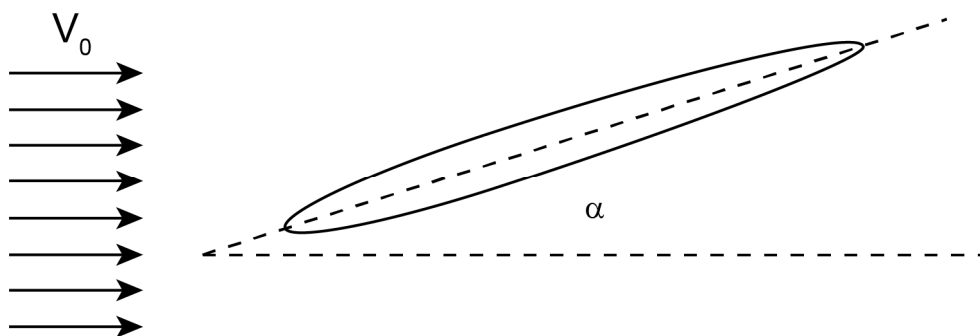
aby ich oś optyczna ustawiona była pod tym samym kątem względem badanego obiektu (Fot. 2). Do kalibracji użyto wydrukowany oraz przymocowany do deski wzór odpowiednio rozmieszczonych znaczników, na podstawie których program komputerowy przeliczał odległości na obrazie wyrażone w pikselach na odległości rzeczywiste w metrach. Po kalibracji wykonano pomiary właściwe, z których każdy składał się z dwóch etapów. Najpierw wykonywano zdjęcie pierwsze przy wyłączonym tunelu aerodynamicznym. Następnie rejestrowano drugie zdjęcie przy zadanej prędkości napływu, a więc przy obciążeniu aerodynamicznym działającym na płat. Przy użyciu metody korelacji adaptacyjnej (ang. *Adaptive Correlation*) obliczano dwuwymiarowe pola przemieszczeń znaczników na zdjęciu pierwszym oraz drugim, na podstawie których rekonstruowana była trzecia składowa przemieszczenia.



Fot. 2. Stanowisko pomiarowe

#### 4. Wyniki badań

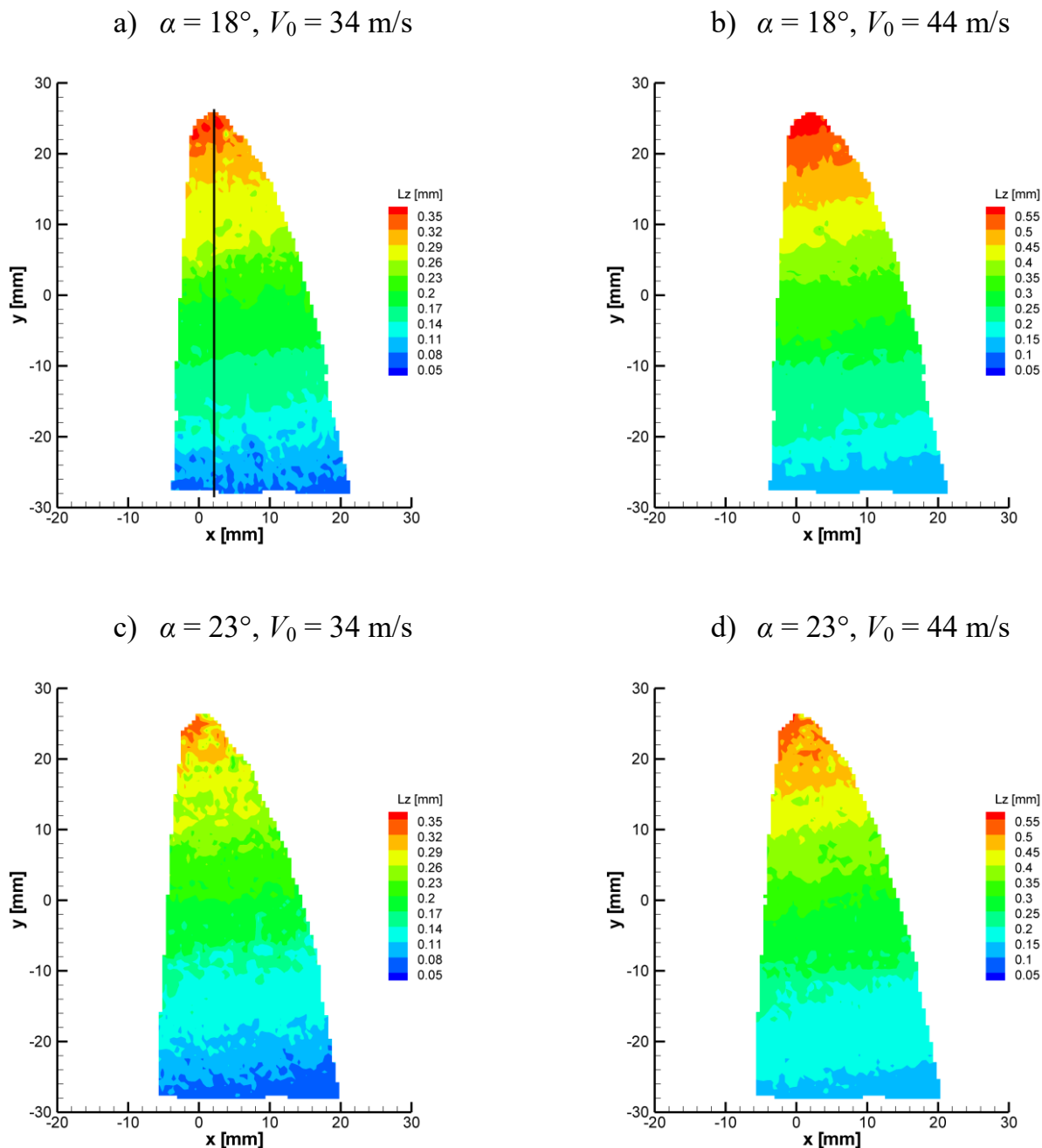
Pomiary wykonano dla dwóch kątów natarcia  $18^\circ$  oraz  $23^\circ$  oraz dwóch prędkości napływu powietrza  $V_0$  wynoszących 34 oraz 44 m/s w tunelu aerodynamicznym niskich prędkości (Rys. 1).



Rys. 1. Schemat ustawienia płata w komorze pomiarowej

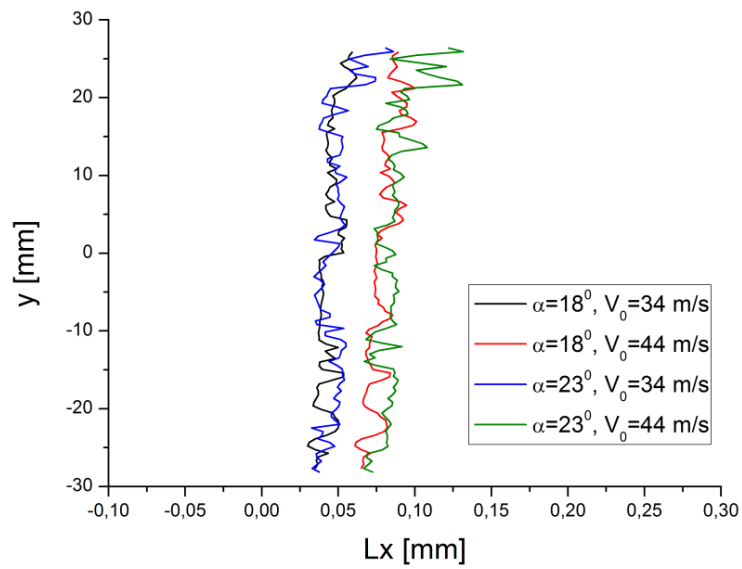
Pomiary wykonano w stałej temperaturze  $21^\circ\text{C}$  oraz wilgotności względnej powietrza wynoszącej 38%. W obliczeniach użyto algorytmu korelacji adaptacyjnej, z oknem interogacji  $16 \times 16$  px, funkcję „Overlap” na poziomie 25% oraz procedurę maskowania wektorów po obrysie modelu.

Ze względu na usytuowanie modelu pod kątem do napływu większa siła działała na płat w kierunku osi z aniżeli w pozostałych kierunkach. Na rysunku 2 zaprezentowano kontury składowej przemieszczeń  $L_z$ . Widać wyraźnie, że badany obiekt ugina się pod wpływem działania sił aerodynamicznym. Maksymalne wartości przemieszczeń  $L_z$  na końcu płata wynosiły dla prędkości napływu 34 m/s ok. 0,36 mm (dla kąta  $18^\circ$ ) oraz 0,33 mm (dla kąta  $23^\circ$ ). Dla prędkości napływu 44 m/s wartości te wynosiły odpowiednio 0,57 mm oraz 0,53 mm. Nieco większe wartości  $L_z$  uzyskano dla kąta natarcia  $18^\circ$  niż dla kąta  $23^\circ$ . Podczas wykonywania eksperymentów zaobserwowano również, wynikające z silnej turbulencji przepływu drgania modelu płata których amplituda wynosiła ok. kilkudziesięciu mikronów.

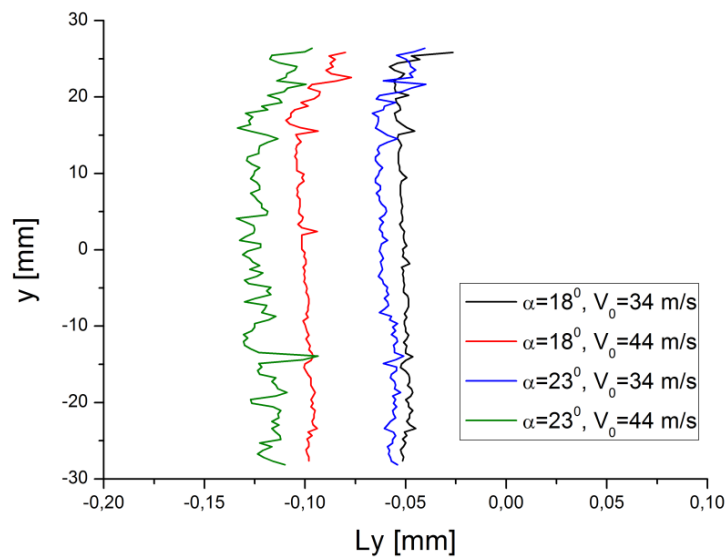


Rys. 2. Kontury przemieszczeń  $L_z$  dla różnych kątów natarcia oraz prędkości napływu

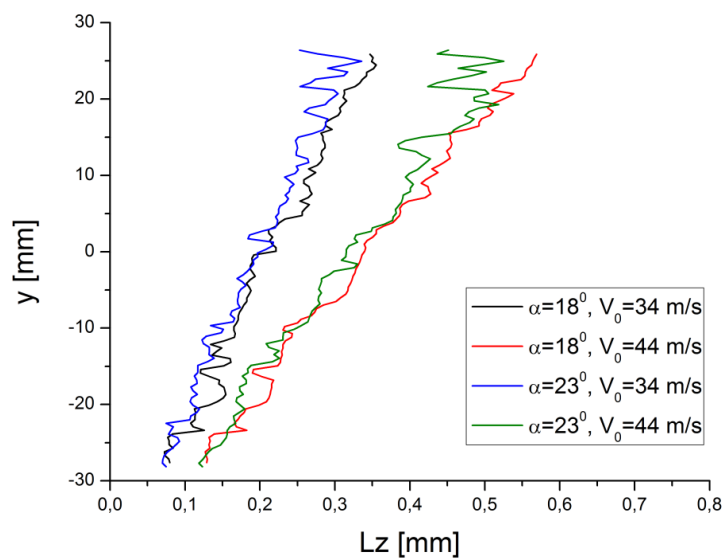
Na rysunkach 3,4,5 przedstawiono rozkład trzech składowych przemieszczeń wzdłuż linii równoległej do osi Y przechodzącej przez najwyższy punkt płata (Rys. 2a). Wartości składowej  $L_x$  dla wszystkich wariantów pomiarowych nie przekraczają 0,15 mm. Linie ugięcia w kierunku osi Z zaprezentowano na Rys. 5. Ujemne wartości składowej  $L_y$  również świadczą o ugięciu się płata w kierunku Z (Rys. 4). Dla prędkości napływu 44 m/s otrzymano większe wartości przemieszczeń  $L_z$ , niż dla prędkości napływu 34 m/s.



Rys. 3. Rozkład przemieszczenia  $L_x$  wzdłuż linii  $y = 2$  mm



Rys. 4. Rozkład przemieszczenia  $L_y$  wzdłuż linii  $y = 2$  mm.



Rys. 5. Rozkład przemieszczenia  $L_z$  wzdłuż linii  $y = 2$  mm

## 5. Podsumowanie

W publikacji przedstawiono pomiary przemieszczeń modelu płata lotniczego wywołanych poprzez działanie sił aerodynamicznych. Dla zadanych prędkości oraz kątów natarcia następuje ugięcie modelu w kierunku osi Z, które zmierzono przy użyciu metody Stereo PIV. Prezentowane wyniki eksperymentów dają podstawę do dalszych analiz nad możliwością zastosowania metody PIV do pomiarów przemieszczeń ciał stałych. Analiza ta powinna być oparta na walidacji metody poprzez porównanie wyników z pomiarami np. tensometrycznymi. Można również wyniki pomiarów porównać z wynikami symulacji numerycznych FSI (ang. *Fluid Structure Interaction*).

Praca finansowana ze środków statutowych na rozwój młodych pracowników nauki Instytutu Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk w 2018 r.

## Literatura

- [1] Piotr M. Korczyk, *Drobnoskalowa Turbulencja W Procesie Mieszania Chmury Z Otoczeniem – Model Laboratoryjny*, IPPT PAN, praca doktorska, 2008 [http://prace.ippt.gov.pl/IFTR\\_Reports\\_4\\_2008.pdf](http://prace.ippt.gov.pl/IFTR_Reports_4_2008.pdf)
- [2] Zbigniew L. Kowalewski, Lech Dietrich, Mateusz Kopeć, Tadeusz Szymczak, Paweł Grzywna, *Nowoczesne Systemy Optyczne w Badaniach Mechanicznych – Budowa, Działanie, Zastosowania*, XXII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów Zakopane, 16-18 marca 2016.
- [3] Andrzej Nowakowski, Jacek Sobczyk, Janusz Nurkowski, Marek Gawor, Zbigniew Lizak, Maciej Bujalski, *Porównanie wyników pomiaru deformacji próbki tensometrami elektrooporowymi i metodą fotogrametryczną*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 15, nr 1-2, czerwiec 2013, s. 95-109.
- [4] Markus Raffel, Christian Willert, Fulvio Scarano, Christian Kahler, Steven Wereley, Jurgen Kompenhans, *Particie Image Velocimetry. A Practical Guide*. Third Edition, Springer 2018.

## Application of Stereo PIV method to study displacements caused by aerodynamic forces

### Abstract

The article presents measurements of deformation of a solid body under the influence of aerodynamic forces by means of the Stereo Particle Image Velocimetry method. A fragment of the airfoil model made in 1:72 scale was selected as the research object. Measurements were made for two angles of attack and two inflow velocities, for which contours and distributions of the component displacements were determined.

**Keywords:** Stereo Particle Image Velocimetry, deformation, airfoil, displacement