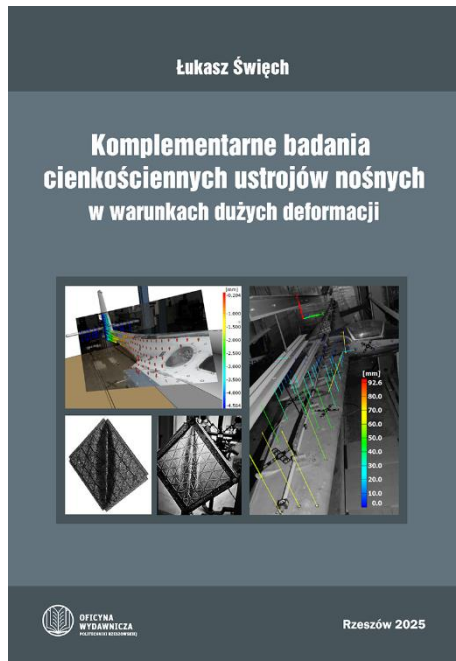


# KOMPLEMENTARNE BADANIA CIENKOŚCIENNYCH USTROJÓW NOŚNYCH W WARUNKACH DUŻYCH DEFORMACJI

Łukasz Święch



Monografia

słowa kluczowe: *konstrukcje cienkościenne, nieliniowe analizy numeryczne, stateczność, badania doświadczalne, MES, DIC, cyfrowa korelacja obrazu, stany pokrytycznej deformacji*

© Copyright by Oficyna Wydawnicza  
Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2025

dodruk

ISBN 978-83-7934-753-7

218 stron

format B5

oprawa twarda

## SPIS TREŚCI

1. **Słowo wstępne**
  - 1.1. Wprowadzenie
  - 1.2. Cel i zakres pracy
2. **Podstawy teoretyczne**
  - 2.1. Wprowadzenie
  - 2.2. Nieliniowość geometryczna
  - 2.3. Związki konstytutywne
  - 2.4. Rodzaje i źródła nieliniowości
  - 2.5. Ścieżka równowagi
  - 2.6. Równania stanu
3. **Numeryczne metody rozwiązywania zagadnień nieliniowych**
  - 3.1. Wprowadzenie
  - 3.2. Metody rozwiązania
  - 3.3. Stateczność zlinearyzowana
4. **Narzędzia badań doświadczalnych**
  - 4.1. Wprowadzenie
  - 4.2. Tensometria elektrooporowa i światłowodowa
  - 4.3. Badania polaryzacyjno-optyczne
  - 4.4. Metoda cyfrowej korelacji obrazu
5. **Uwarunkowania bieżącego śledzenia zgodności wyników obliczeń numerycznych oraz badań eksperymentalnych**
  - 5.1. Wprowadzenie
  - 5.2. Ustroje wzmacniane usztywnieniami geodetycznymi
    - 5.2.1. Wprowadzenie
    - 5.2.2. Podstawy teoretyczne
    - 5.2.3. Przedmiot badań
    - 5.2.4. Analiza odchyłek wykonawczych

- 5.2.5. Badania doświadczalne
- 5.2.6. Analizy numeryczne w ujęciu MES
- 5.2.7. Konfrontacja wyników badań eksperymentalnych i analiz numerycznych
- 5.2.8. Analiza sposobu modelowania szczegółów geometrii konstrukcji
- 5.2.9. Wpływ parametrów kontroli rozwiązania na otrzymywane rezultaty
- 5.2.10. Porównanie wyników MES dla płyty gładkiej i żebrowanej
- 5.2.11. Wpływ wykroju w płycie usztywnianej
- 5.2.12. Wnioski i podsumowanie badań nad strukturami usztywnianymi żebrami geodetycznymi
- 5.3. Płyty wzmacniane niskimi, równoległymi żebrami w stanach zaawansowanych deformacji
- 5.4. Analiza struktur nośnych wytwarzanych w technologii druku przestrzennego
  - 5.4.1. Wprowadzenie
  - 5.4.2. Badania płyt poddanych ścinaniu
  - 5.4.3. Badania wielosegmentowych ustrojów nośnych poddanych skręcaniu
- 6. Stosowanie optycznych metod pomiarowych do badań konstrukcji lotniczych**
  - 6.1. Wprowadzenie
  - 6.2. Przykłady
    - 6.2.1. Przykład badania tylnej części kadłuba motoszybowca
    - 6.2.2. Badania zmęczeniowe kompozytowego dźwigara skrzydła motoszybowca
    - 6.2.3. Badania wpływu dodatkowego zasobnika na aparaturę pomiarową na właściwości lotne szybowca
- 7. Uwagi końcowe**
  - 7.1. Realizacja pracy
  - 7.2. Oryginalne elementy pracy
  - 7.3. Kierunki dalszych badań

#### Literatura

#### Streszczenie

#### Abstract

## Komplementarne badania cienkościennych ustrojów nośnych w warunkach dużych deformacji

### Streszczenie

Przedmiotem rozważań była analiza zasadności prowadzenia komplementarnych badań doświadczalnych cienkościennych ustrojów nośnych pracujących w stanach zaawansowanych deformacji. Wyniki tego rodzaju badań dostarczają materiałów porównawczych do oceny rezultatów obliczeń numerycznych prowadzonych z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznych i fizycznych.

W pierwszej części monografii przedstawiono zarys teoretycznych podstaw deformacji nieliniowych oraz numerycznych metod rozwiązywania tego typu zagadnień, których znajomość stanowi podstawę poprawnego opracowania modeli dyskretnych rozważanych struktur nośnych. Następnie omówiono główne metody badań doświadczalnych, ze szczególnym uwzględnieniem metody cyfrowej korelacji obrazu (DIC).

Zasadniczą część pracy stanowią analizy porównawcze wyników przeprowadzonych badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych. Rozważane przykłady obejmują przypadki integralnych struktur wzmacnianych usztywnieniami geodetycznymi wykonanymi z lotniczych stopów aluminium, płyt usztywnianych nisko-profilowymi żebrami usytuowanymi równolegle względem siebie oraz strukturami o programowalnych właściwościach fizycznych wytwarzanych w technologii druku przestrzennego. Modelowe struktury poddawano obciążeniu, które wywoływało w nich stan czystego ścinania. Obserwowane deformacje obejmowały stan pokrytyczny oraz odkształcenia plastyczne.

Badania doświadczalne prowadzono z zastosowaniem optycznych systemów pomiarowych opartych na metodzie cyfrowej korelacji obrazu, co umożliwiło rejestrację pól deformacji w kolejnych etapach badania, dając podstawę do ich ilościowej oceny oraz identyfikacji ścieżek równowagi, czyli relacji pomiędzy reprezentatywnym przemieszczeniem i obciążeniem, które umożliwiają śledzenie zachowania się struktury w warunkach deformacji pokrytycznych.

Równolegle z badaniami eksperymentalnymi prowadzono obliczenia numeryczne w ujęciu Metody Elementów Skończonych w sformułowaniu przemieszczeniowym. Analizy numeryczne w ujęciu nieliniowym, które w istocie sprowadzają się do rozwiązania układu równań algebraicznych odpowiadających dyskretyzacji analizowanego ciała, rozwiązywano z zastosowaniem zmodyfikowanej metody prognostycznej Newtona-Raphsona z procedurami korekcji obciążenia. Do opisu dyskretnych układów, którymi aproksymowano rozważane struktury, wykorzystywano głównie cienkościennie, powłokowe elementy skończone. Poza nieliniowościami natury geometrycznej związanymi z pojawiającymi się skończonymi deformacjami po utracie stateczności, w analizach numerycznych rozważano również nieliniowe związki konstytutywne.

Wykorzystano sprężysto-plastyczny model materiału ze wzmocnieniem, co umożliwiło numeryczne odtworzenie trwałych deformacji.

Przeprowadzone badania doświadczalne oraz analizy numeryczne dowiodły skuteczności przyjętego narzędzia, jakim jest system pomiarowy oparty na metodzie cyfrowej korelacji obrazu skojarzony z koncepcją bieżącej analizy numerycznej. Koncepcja umożliwia w sposób zadowalający identyfikację stanów deformacji oraz stanów naprężenia struktur w pełnym zakresie warunków eksploatacyjnych. Stosowanie metody DIC pozwala na ocenę i modyfikację modeli numerycznych tworzonych do rozwiązywania zagadnień fizycznie i geometrycznie nieliniowych w ujęciu Metody Elementów Skończonych. Identyfikacja wstępnej deformacji struktury oraz śledzenie zmian na każdym z etapów obciążenia zezwala na zachowanie daleko idącej dokładności w odtwarzaniu deformacji struktury w stanach pokrytycznych. Wykorzystanie metody DIC umożliwia dokonywanie pomiarów deformacji w formie polowej, a co za tym idzie – stwarza możliwość śledzenia efektów lokalnych, często pomijanych w przypadku stosowania tradycyjnych metod pomiarowych, mimo ich decydującego wpływu na przedwczesne zniszczenie konstrukcji.

W monografii zaprezentowano również rezultaty badań konstrukcji lotniczych prowadzonych z wykorzystaniem cyfrowych systemów optycznych. Zaprezentowano przykłady obejmujące wyniki uzyskane w trakcie statycznych badań wytrzymałościowych motoszybowca AOS-H2, badań zmęczeniowych kompozytowego dźwigara skrzydła oraz pomiarów deformacji podczas badań w tunelu aerodynamicznym zmodyfikowanego kadłuba szybowca PW-6.

Oryginalnym elementem pracy i jednym z głównych jej celów było wykazanie zasadności prowadzenia już na etapie projektowania, komplementarnych badań doświadczalnych, które umożliwiają dokonywanie weryfikacji poprawności wyników analiz numerycznych struktur cienkościennych pracujących w stanach deformacji pokrytycznych. W miarę poznawania charakteru pracy konstrukcji po utracie stateczności możliwe staje się przesunięcie zakresu naprężenia dopuszczalnego bliżej obciążeń niszczących strukturę, przy zachowaniu wymaganego zapasu bezpieczeństwa. Podejście takie umożliwia lepsze wykorzystanie materiału, a co za tym idzie – minimalizację masy struktury nośnej, co ma kluczowe znaczenie zwłaszcza w przypadku wytrzymałości konstrukcji lotniczych.