

**Prof. dr hab. inż. Marek Orkisz**  
**Mgr inż. Łukasz Święch**  
**Dr inż. Jan Zacharzewski**

Katedra Samolotów i Silników Lotniczych  
Politechnika Rzeszowska  
ul. Powstańców Warszawy 8, 35-021 Rzeszów  
e-mail: [mareko@prz.edu.pl](mailto:mareko@prz.edu.pl), [lukasz.swiech@gmail.com](mailto:lukasz.swiech@gmail.com), [jzacharz@prz.rzeszow.pl](mailto:jzacharz@prz.rzeszow.pl)

## **Badania zmęczeniowe kompozytowego dźwigara skrzydła motoszybowca**

**Słowa kluczowe:** *struktury kompozytowe, badania zmęczeniowe, tensometry oparte o siatkę Bragg'a, metoda elementów skończonych (MES), skanowanie przestrzenne*

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono badania eksperymentalne i numeryczne dźwigara skrzydła. Fragment dźwigara poddano jednostopniowemu testowi zmęczeniowemu, obejmującemu 10.000 cykli obciążeń odpowiadających oscylacjom współczynnika obciążeń od  $n_{z \min} = -3.7$  do  $n_{z \max} = 5.7$ . Test taki proponowany jest jako alternatywa dla próby z zastosowaniem pełnego spektrum obciążeń. W trakcie badań wykorzystano skanowanie przestrzenne, jako propozycję szybkiej metody inspekcji newralgicznych obszarów konstrukcji. Zastosowanie do pomiaru odkształceń systemu światłowodowych czujników tensometrycznych opartych na siatce Bragga'a pozwoliło na zaobserwowanie zjawiska lokalnego, okresowego umacniania struktury.

### **1. Wprowadzenie**

Uruchomienie produkcji nowego typu motoszybowca związane jest z przeprowadzeniem badań zmęczeniowych mających dowiedzieć, że spełniony jest warunek trwałości użytkowej konstrukcji. Współczesne konstrukcje szybowców i motoszybowców kompozytowych powinny spełniać minimum wynoszące 9000 godzin lotu. Daje to możliwość ponad dwudziestoletniej eksploatacji przy statystykach rocznego nalotu przeciętnego użytkownika. Warunki takie były przedmiotem badań autorów prac [1,2,3,5,6,7,8]. Trwałość zmęczeniowa struktury nośnej kompozytowej konstrukcji cienkościennej polega na wykazaniu, że obciążenia eksploatacyjne w założonym okresie użytkowania konstrukcji nie spowodują takiego osłabienia struktury, które naruszy obowiązujący współczynnik bezpieczeństwa, będący stosunkiem obciążeń niszczących do obciążeń dopuszczalnych. Dla ogółu konstrukcji lotniczych współczynnik ten ma wartość 1,5. Wytrzymałość pozostała na końcu użytkowania takiej konstrukcji nie może być mniejsza niż 150% obciążeń dopuszczalnych.

Dowód trwałości zmęczeniowej może być przeprowadzony przez próby zmęczeniowe. Programy prób zmęczeniowych związane są z różnymi właściwościami cech zmęczeniowych elementów kompozytowych. Cechą kompozytów zbrojonych włóknami jest to, że są one niewrażliwe na obciążenia zmienne o niskich wartościach, natomiast ich trwałość zmęczeniowa i wytrzymałość pozostała ulega znacznemu zmniejszeniu wskutek występowania pojedynczych obciążeń bliskich dolnej granicy rozrzutu wytrzymałości doraźnej.

Wymienione powyżej własności kompozytów powodują, że zamiast kosztownych badań stanowiskowych całego motoszybowca bardziej ekonomiczne może być wykazanie trwałości zmęczeniowej fragmentów struktury płatowca. Racjonalnym jest podzielenie programu badań zmęczeniowych struktury kompozytowej na następujące etapy:

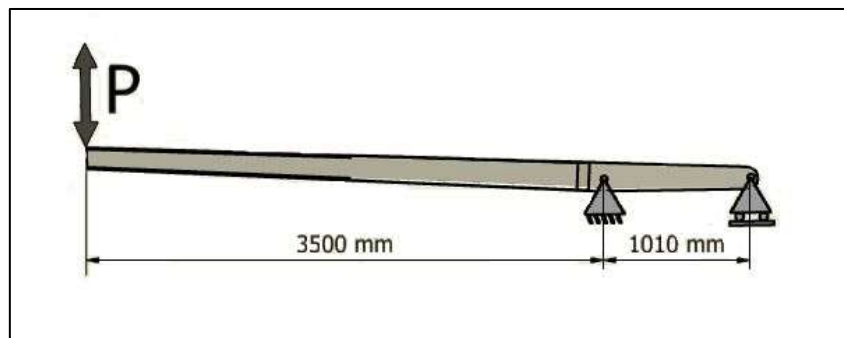
- a. Badania węzłów wprowadzania sił skupionych na strukturę kompozytową;
- b. Badania najbardziej wysiłonego elementu struktury jakim jest dźwigar skrzydła;
- c. Badania zespołu skrzydło-kałdub.

## 2. Warunki obciążenia i zamocowania badanego dźwigara

Zasadniczym zadaniem w czasie przygotowywania badań eksperymentalnych rzeczywistych struktur jest zapewnienie warunków obciążenia oraz zamocowania odwzorowujących możliwie dokładnie warunki pracy elementu. Badany dźwigar kompozytowy montowany jest w kałdubie motoszybowca poprzez dwa okucia znajdujące się w jego części bagnetowej.

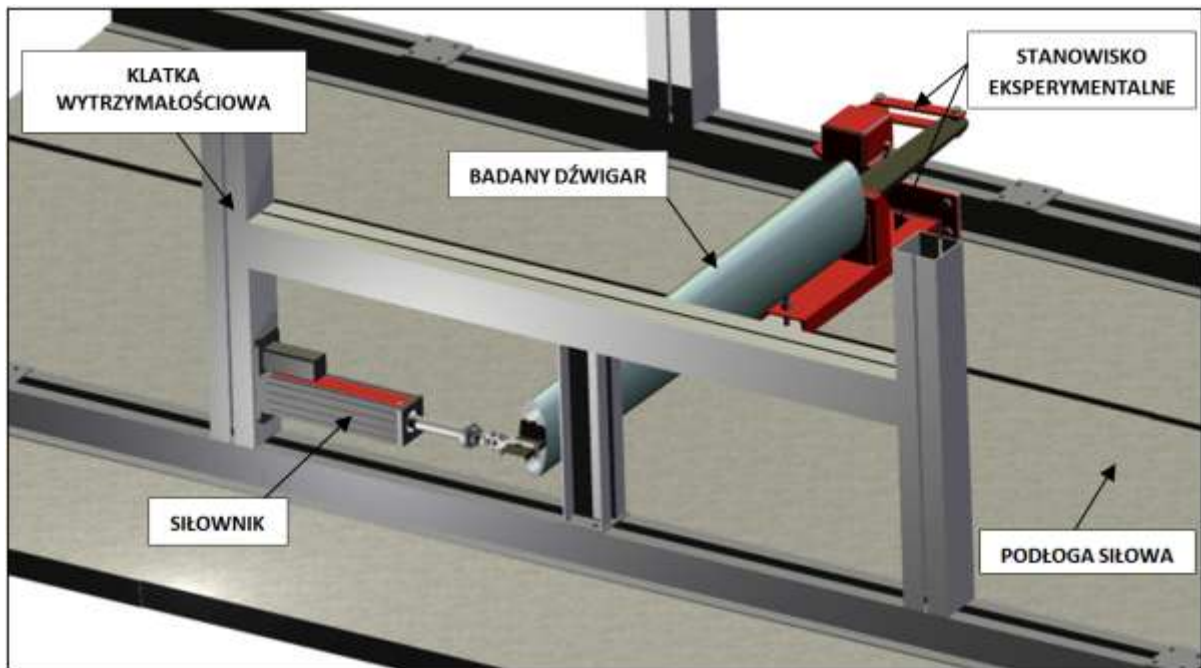
Podczas lotu motoszybowca poprzez strukturę skrzydła na dźwigar przenoszone są siły pojawiające się na skutek działania rozkładu ciśnień na powierzchni skrzydła. Zatem dźwigar pracuje w złożonym stanie obciążenia. Warunki takie są niezwykle trudne do odtworzenia podczas prób zmęczeniowych, ze względu na konieczność sterowania wieloma parametrami, co prowadzi do skomplikowanego systemu obciążającego.

Dla uproszczenia, zdecydowano się na przeprowadzenie jednoparametrowej próby zmęczeniowej. Dla dźwigara skrzydła przyjmuje się, jako wymiarujące, obciążenie siłą tnącą. W ten sposób zapewniono wystąpienie w części bagnetowej siły tnącej i momentu gnącego, o wartościach odpowiadających rzeczywistemu obciążeniu konstrukcji.



Rys. 1 Schemat zamocowania i obciążenia badanego dźwigara

Ze względu na gabaryty dźwigara (4,5 m długości), w obawie przed błędami konstrukcyjnymi, w środowisku CAD zaprojektowano kompletne stanowisko wraz z fragmentem klatki wytrzymałościowej i podłogi siłowej będącej miejscem zamocowania (rys.2).



Rys. 2 Model CAD stanowiska badawczego



Rys. 3 Widok ogólny stanowiska do badań z zamocowanym dźwigarem

W celu zabezpieczenia dźwigara przed utratą stateczności stworzono keson wykonany z szklanej tkaniny kompozytowej wzmocnianej żebrami drewnianymi. Zadaniem kesonu jest odebranie momentu skręcającego powstałego na skutek zwichrzenia dźwigara.



Rys. 4 Keson usztywniający dźwigar



Rys. 5 Wprowadzenie siły skupionej na dźwigar

### 3. Spektrum obciążenia

Korzystając z doświadczeń i sugestii zawartych w [3], badany dźwigar poddano monocyklicznemu spektrum obciążenia, unikając w ten sposób konieczności przeprowadzenia długotrwałych i kosztownych badań przy wykorzystaniu pełnego, eksploatacyjnego spektrum.

Podczas próby, siłę generowano przy użyciu siłownika elektro-mechanicznego Zwick-Roell, sterując poziomem siły. Rysunek nr 6 przedstawia zrealizowane spektrum obciążenia. Współczynnik asymetrii cyklu wynosił  $R = -0,65$  co odpowiada zmianom współczynnika obciążenia w zakresie od  $n = 5,7$  do  $n = -3,7$ . Program prób zakładał zrealizowanie 10.000 cykli obciążenia.



Rys. 6 Realizowane spektrum obciążenia

#### 4. Konstrukcja dźwigara

Badany dźwigar jest konstrukcją w pełni kompozytową. Wykonany jest jako belka dwuteowa. Newralgicznym obszarem jest tzw. bagnet dźwigara, łączący skrzydło z kadłubem, pozostała część ma za zadanie zapewnienie przenoszenia sił tnących i momentu gnącego ze skrzydła na kadłub.

Część bagnetowa posiada strukturę przekładkową, rdzeń wykonany jest z pianki poliuretanowej DIV-60 umieszczonej pomiędzy dwudziestoma sześcioma warstwami tkaniny węglowej SGL KDK 8042. W obszarach szczególnie obciążonych zawierających okucia, zastosowano odmienne kierunkowanie warstw, tzw. dekoncentratory naprężeń. Całość przykryto jedną warstwą licową tkaniny szklanej Interglas 92110. Pasy dźwigara wykonane są z węglowego kompozytu jednokierunkowego (rowingu) Torayca T700G. Ściankę części dźwigara znajdującej się wewnątrz skrzydła tworzy struktura laminarna z odpowiednio stopniowanej tkaniny węglowej.



Rys 7 a) Schemat struktury kompozytowego dźwigara  
b) Konstrukcja zamka labiryntowego

Punkty mocowania (wprowadzania sił skupionych w strukturę kompozytu) zostały wykonane jako stalowe tuleje tworzące tzw. zamek labiryntowy. Schematyczną budowę okuć przedstawia rysunek 7b.





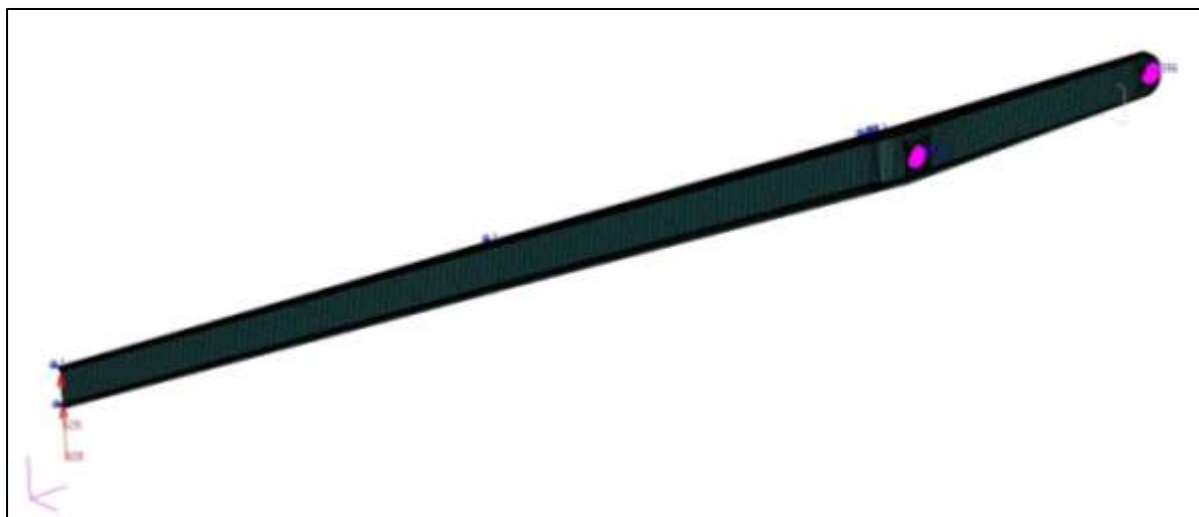
Rys. 8 Część bagnetowa badanego dźwigara

Dźwigar zaprojektowano i wykonano na wydziale MEiL Politechniki Warszawskiej.

### 5. Analiza modelu dźwigara Metodą Elementów Skończonych

Wytrzymałościowa analiza numeryczna miała na celu uzupełnienie prób zmęczeniowych, pozwalając na zapoznanie się z polami przemieszczeń i naprężeń w badanej konstrukcji. Obliczenia przeprowadzone zostały przy użyciu programu MSC Nastran 2010, z wykorzystaniem procedur liniowej analizy statycznej.

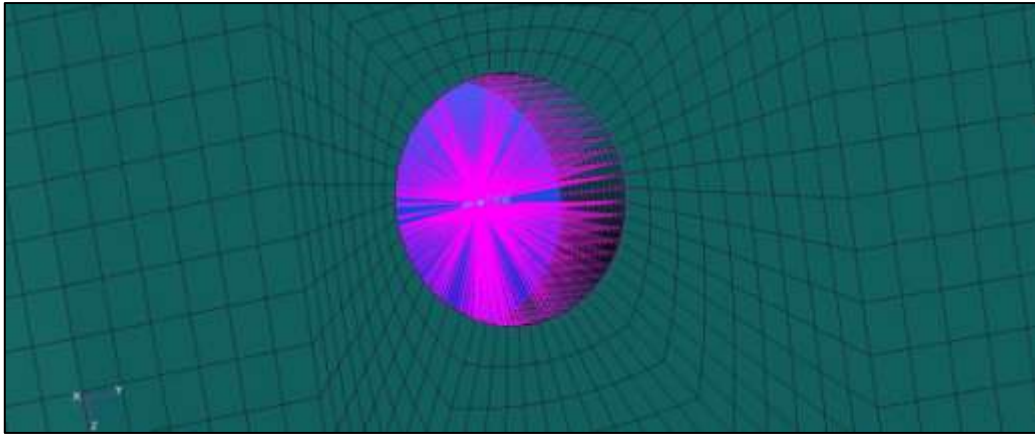
Na podstawie szczegółowej geometrii stworzono uproszczony model bryłowy dźwigara (rys. 9), który posłużył do przeprowadzenia obliczeń.



Rys. 9 Uproszczona geometria dźwigara z zaznaczonymi warunkami brzegowymi

Ze względu na konstrukcję dźwigara (skos oraz wznios) zdecydowano się na odtworzenie całego badanego fragmentu, co wyeliminowało konieczność wprowadzania obciążeń jako sił wewnętrznych. Sposób zamocowania oraz obciążenia odpowiada warunkom eksperymentalnym.

Model zbudowany jest zarówno z elementów 1D, 2D jak i 3D. Pasy dźwigara oraz piankowa część bagnetu wykonana jest z ośmiowęzłowych elementów bryłowych, którym nadano odpowiednie właściwości materiałowe, ograniczając się do sprężystego modelu ciała izotropowego. Tkaninę węglową okalającą rdzeń bagnetu oraz pozostałą część ścianki symulują czterowęzłowe elementy powłokowe, o ortotropowym modelu materiału. Jako, że elementy te posiadają dwuwymiarową definicję geometryczną niezbędne stało się również nadanie im cech laminatu poprzez zdefiniowanie kolejnych warstw tkaniny tworzących ściankę bagnetu. Dodatkowo, w celu uniknięcia kłopotliwego zjawiska kontaktowego, stalowe okucia zastąpiono sztywnymi elementami 1D (rys.10).



Rys. 10 Fragment siatki modelu MES i elementy 1D symulujące okucia

Ze względu na małą sztywność skrętną dźwigara oraz aby zapewnić zginanie w jednej płaszczyźnie, odebrano możliwość przemieszczeń poprzecznych do powierzchni ścianki elementom tworzącym górny i dolny pas dźwigara poza obszarem bagnetowym.

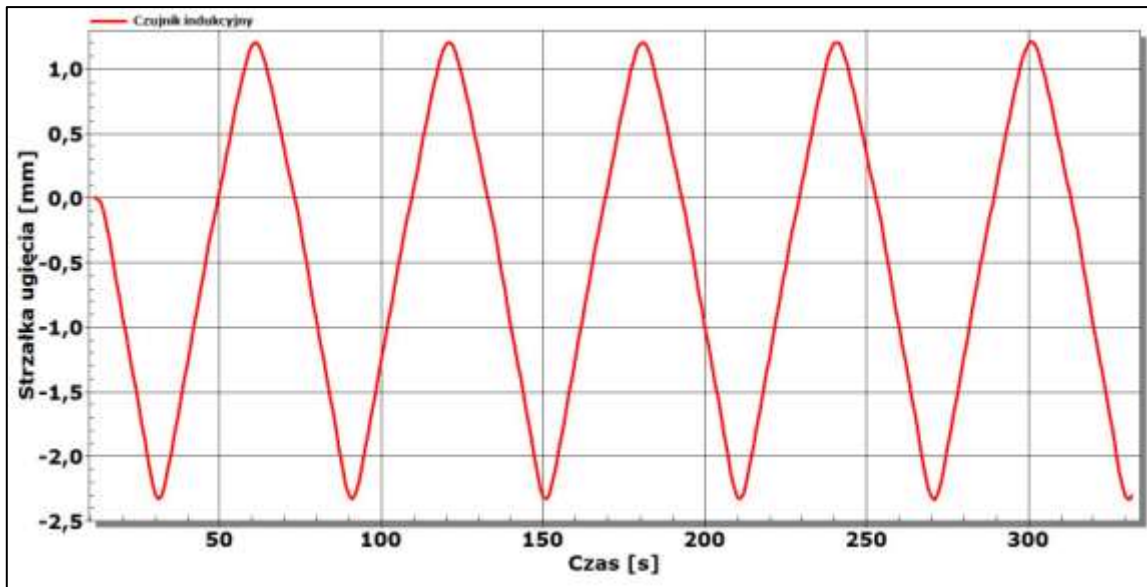
Obciążenie podobnie jak w czasie eksperymentu zrealizowano poprzez przyłożenie siły tnącej do ścianki bagnetu. Przeprowadzono dwie serie analiz, obciążając dźwigar siłami odpowiadającymi współczynnikowi obciążenia  $n=5,7$  oraz  $n=-3,7$ .

## 6. Pomiar strzałki ugięcia bagnetu

Uszkodzenia zmęczeniowe mogą objawiać się poprzez odsztywnienie konstrukcji kompozytowej w czasie eksploatacji ( prób ). Łatwo mierzalnym parametrem świadczącym o zmianach sztywności struktury, jest pomiar linii ugięcia części bagnetowej. Podczas próby zmęczeniowej wykonano pomiary strzałki ugięcia w połowie rozpiętości podpór dźwigara przy pomocy czujnika indukcyjnego. Rejestracji dokonywano przy użyciu mostka tensometrycznego firmy HBM typu Spider8.



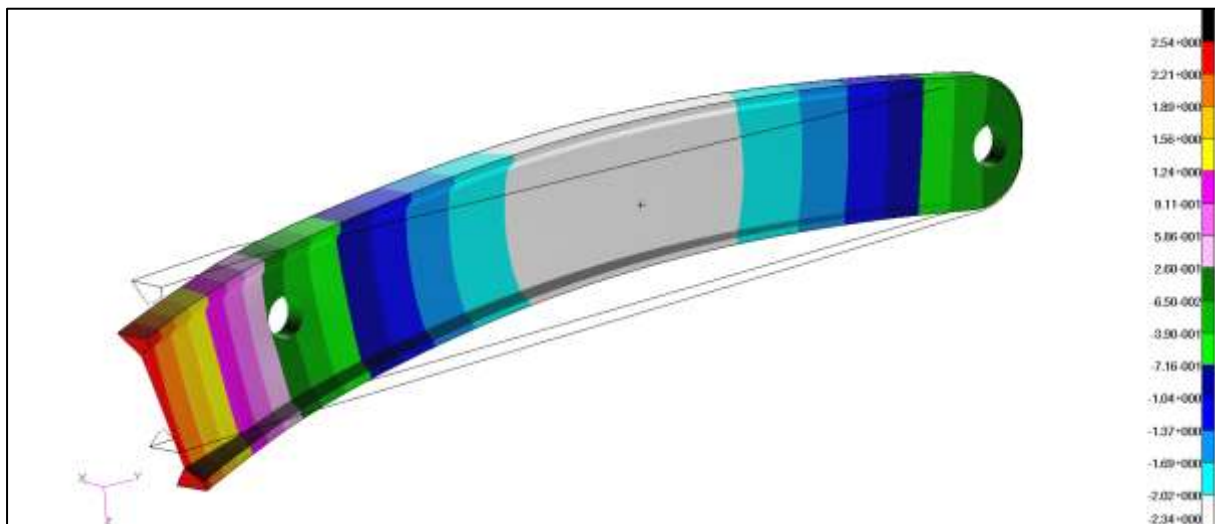
Rys. 11 Zamocowanie czujnika indukcyjnego



Rys. 12 Przykładowe przebiegi wielkości ugięć bagnetu dźwigara

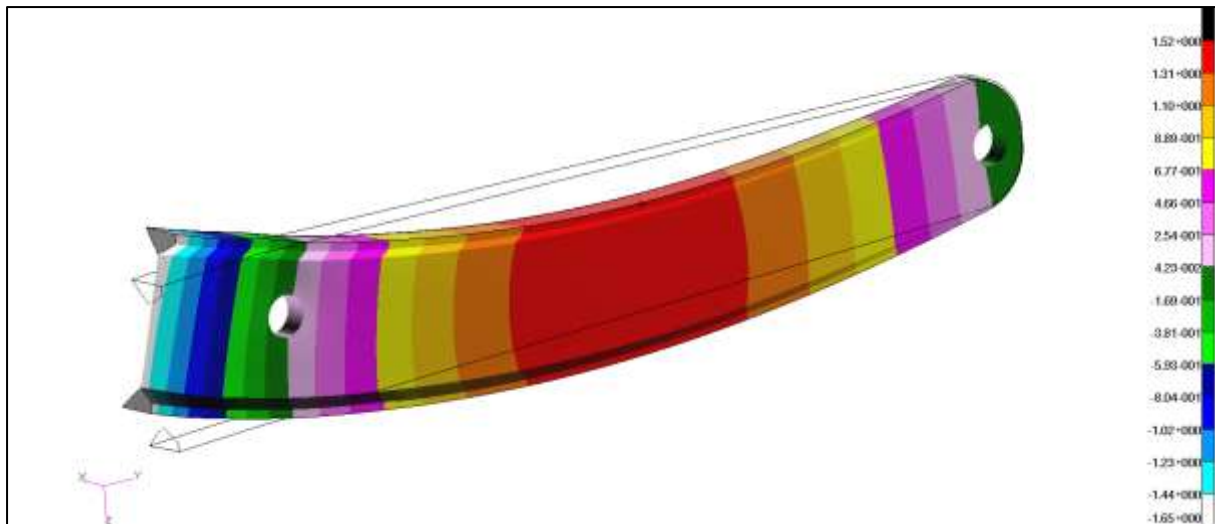
Wielkości ugięć rejestrowane przez czujnik indukcyjny zawierają się w przedziale od -2,3 mm dla obciążenia  $n=5.7$  do 1.3 mm dla obciążenia  $n= -3.7$ . Niemal identyczne wyniki otrzymano w analizie MES (rys. 13 oraz rys. 14).

W czasie realizowania programu prób nie zaobserwowano zmian wartości ugięć bagnetu, co świadczy o braku zmian w sztywności badanej konstrukcji (rys. 15).

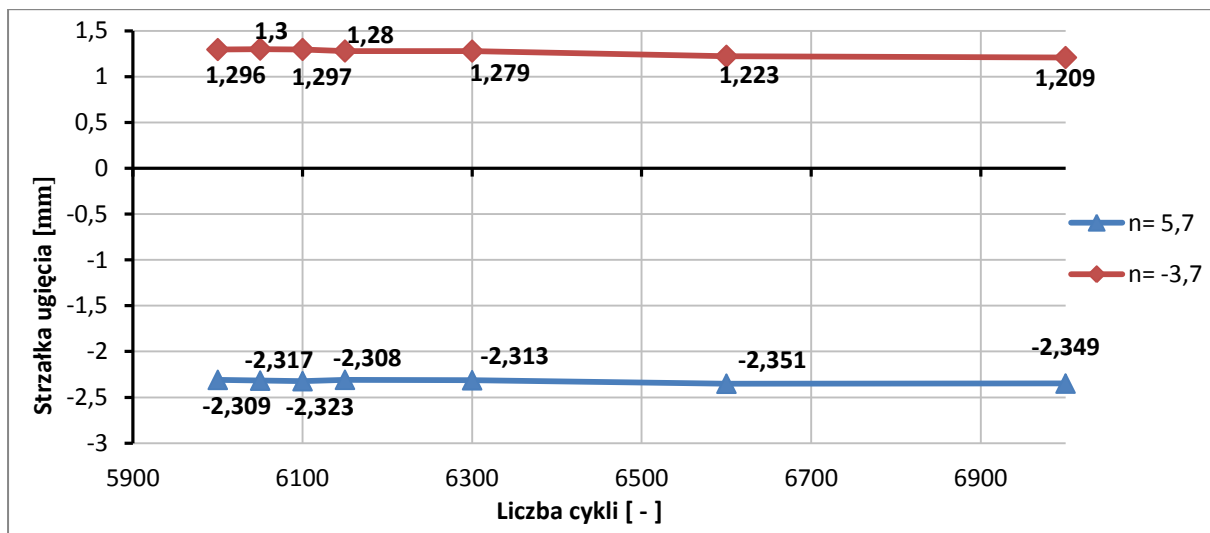


Rys. 13 Strzałka ugięcia bagnetu. Wynik analizy MES. Obciążenie  $n= 5,7$





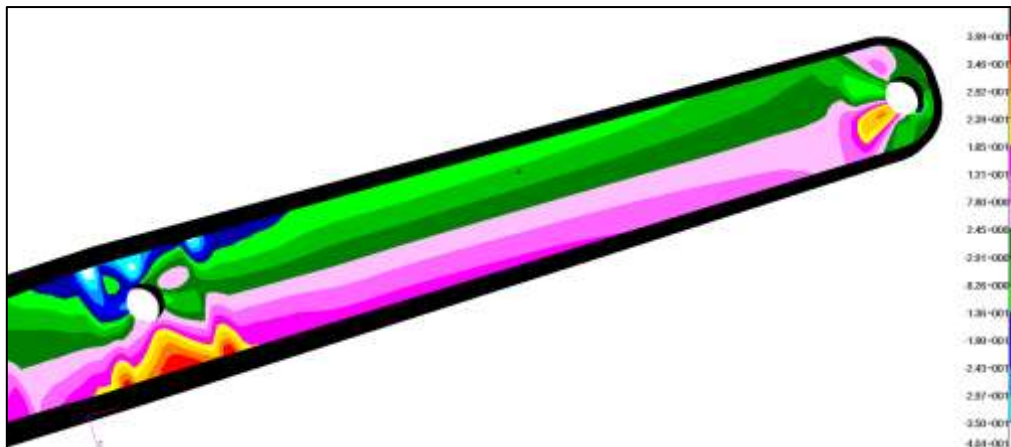
Rys. 14 Strzałka ugięcia bagnetu. Wynik analizy MES. Obciążenie  $n = -3,7$



Rys. 15 Zmiana wskazań czujnika ( strzałki ugięcia) w czasie badania

## 7. Pomiar przemieszczenia węzłów

Miejsca wprowadzania sił skupionych, powodują powstawanie wysokich poziomów naprężenia w strukturze kompozytu sąsiadującej z okuciami (rys. 16), co stwarza niebezpieczeństwo wystąpienia nieodwracalnych odkształceń. Jednym z symptomów alarmujących o możliwości wystąpienia owych zjawisk, jest zmiana odległości pomiędzy wspomnianymi węzłami.

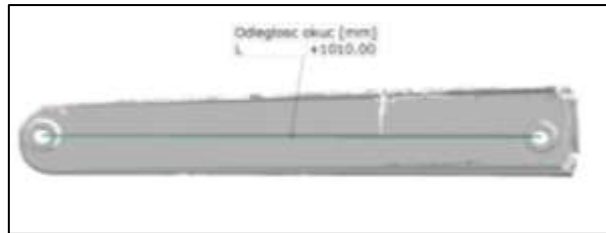


Rys. 16 Naprężenia w części bagnetowej dźwigara

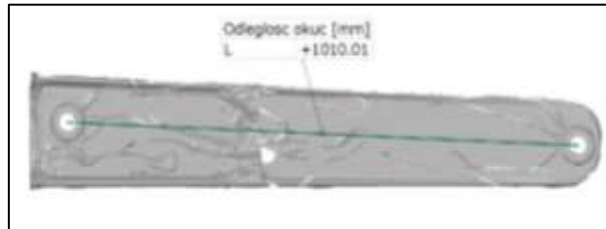
Do pomiaru przemieszczenia węzłów zastosowano skaner optyczny światła białego ATOS, pozwalający na trójwymiarową digitalizację obiektu, wykorzystując metodę mory cieniowej oraz stereoskopowej fotografii. Przy zastosowanym polu pomiarowym otrzymano dokładność na poziomie 0,01 mm. Inspekcji dokonywano każdorazowo po zrealizowaniu 1.000 cykli obciążeń.



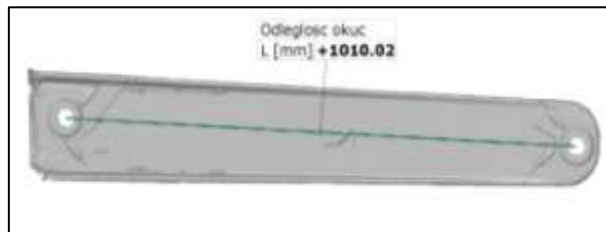
Rys. 17 Skaner ATOS



Rys. 18 Skan bagnetu po 2.000 cykli obciazenia



Rys. 19 Skan bagnetu po 5.000 cykli obciazenia



Rys. 20 Skan bagnetu po 10.000 cykli obciazenia

Jak wynika z przedstawionych obrazów skanowanego bagnetu odleglosc miêdzy wêzlami nie uległa znaczącym zmianom po 10.000 cykli obciazeń.

## 8. Tensometria światłowodowa

Badania kompozytowego dźwigara stały się okazją do przetestowania w warunkach działania długotrwałych obciażeń cyklicznych tensometrycznych czujników światłowodowych. W porównaniu do tradycyjnych pomiarów odkształceń opartych na tensometrach oporowych, testowany system przedstawia wiele zalet, z których na pierwszy plan ( w zastosowaniach lotniczych) wysuwa się mała jego masa. Redukcja masy takiego systemu pomiarowego związana jest z możliwością umieszczenia nawet 13 punktów pomiarowych na jednym włóknie światłowodu [4].



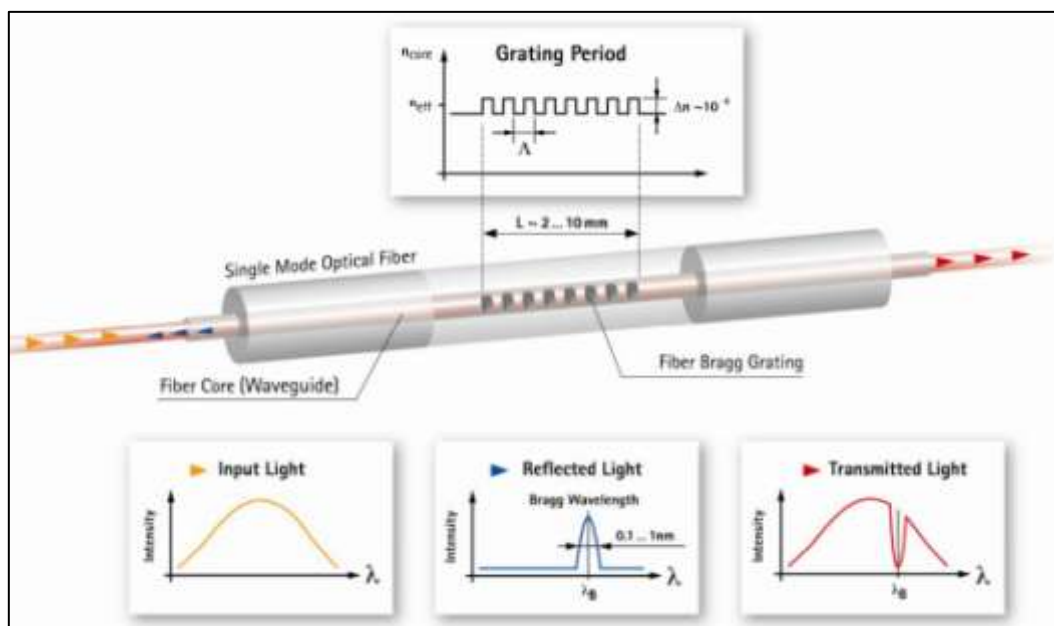
Rys. 21 Zdjęcie przedstawiające tensometr światłowodowy [HBM GmbH]

Zasada działania tensometru światłowodowego opiera się na wykorzystaniu siatki Bragg'a, w postaci periodycznych nacięć na włóknie światłowodowym, mającej za zadanie

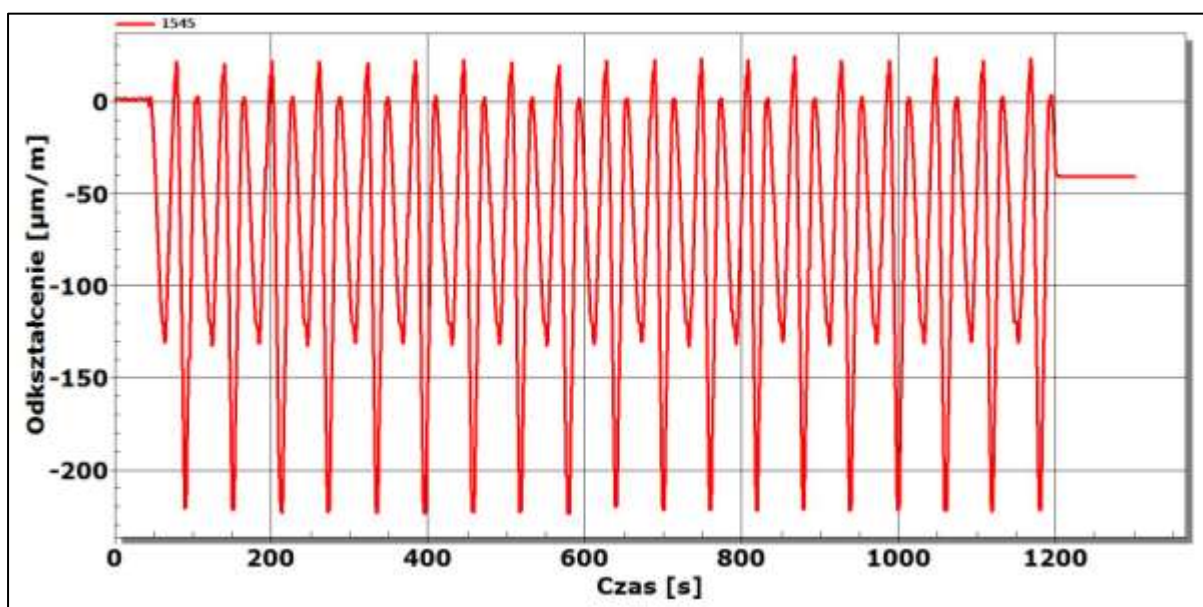
odbijanie określonej długości fali świetlnej. Długość naniesionej siatki jest tym samym bazą tensometru (w zastosowanych czujnikach wynosi ona ok. 6mm).

Sygnal w postaci fali świetlnej generowany jest w urządzeniu zwanym interogatorem, który jest jednocześnie odbiornikiem światła odbitego przez siatkę Bragg'a. Po odbiciu, pozostała część fali świetlnej nadal biegnie przez światłowód (rys. 22) i wykorzystywana jest jako sygnał pomiarowy dla kolejnych czujników o odmiennej konfiguracji naciętej siatki.

Pomiar odkształceń realizowany jest przez porównanie odbitej fali świetlnej o długości zmienionej na skutek wydłużenia lub skrócenia czujnika, do referencyjnej długości fali czujnika nieodkształconego.



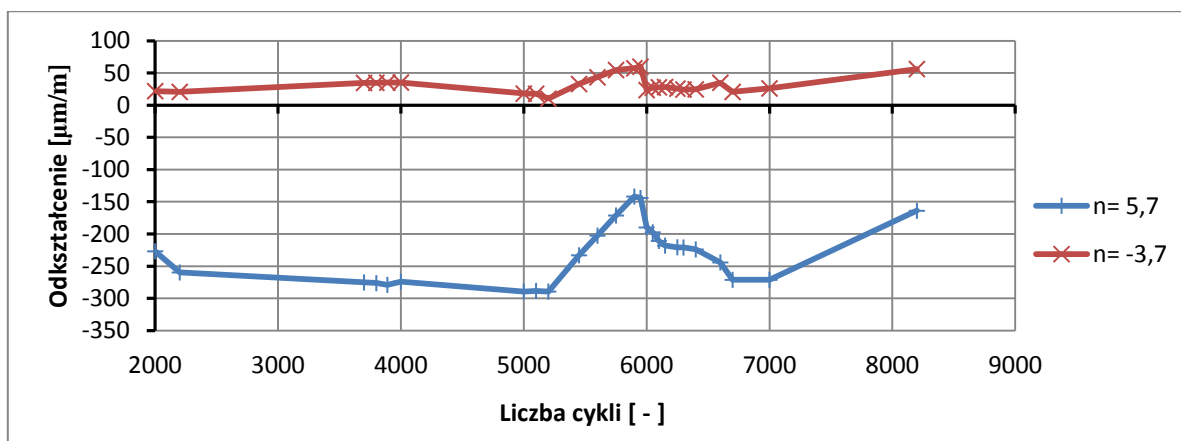
Rys. 22 Zasada działania siatki Bragg'a [HBM GmbH]



Rys. 23 Przykładowy przebieg odkształceń dla tensometru nr 1545 (okolice okucia przedniego) – cykle 6401-6450

W trakcie badania zaobserwowano zmiany poziomu odkształceń w okolicy przedniego okucia (rys. 24). Początkowa faza (do 5.000 cykli) nie wykazała istotnych zmian

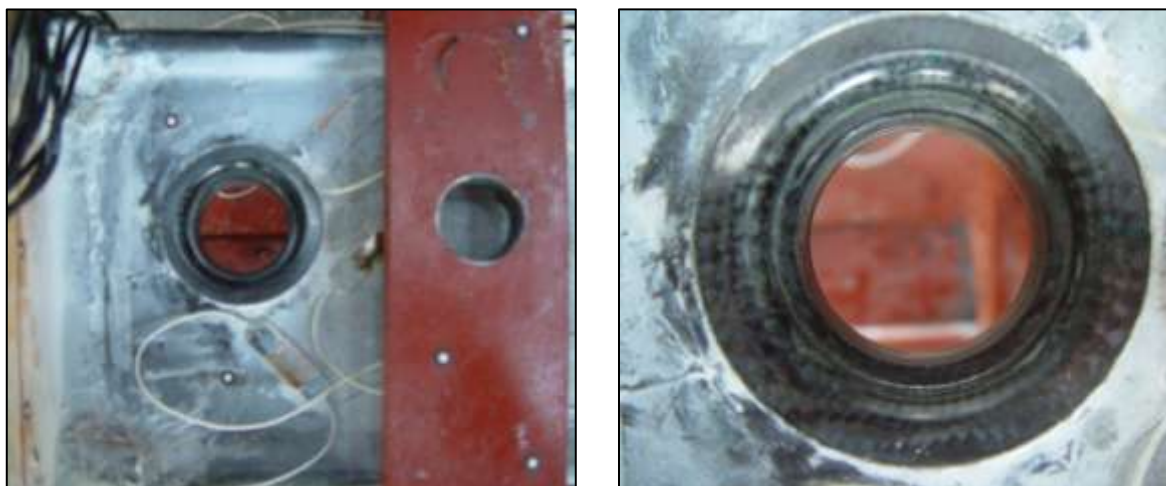
w pracy konstrukcji. Kolejne cykle obciążenia (5.000 – 6.000) spowodowały znaczny spadek mierzonych odkształceń, co może świadczyć o umacnianiu się struktury kompozytowej, związanym z układaniem się włókien węglowych w osnowie z żywicy epoksydowej. Następnie w przeciągu 1.000 cykli wskazania powróciły do stanu wyjściowego. Ostatnia faza badania wykazała kolejną tendencję do usztywniania struktury w miejscu wprowadzania sił skupionych. Należy jednak zaznaczyć fakt, iż konstrukcja w ujęciu makroskopowym nie przejawiała znaczących zmian w sztywności, objawiającym się np. zmianą ugięcia dźwigara co pozwala stwierdzić, że zaobserwowane zjawisko ma charakter lokalny.



Rys. 24 Zmiana odkształceń tensometru w czasie badania (tensometr nr 1545)

### 9. Inspekcja geometrii węzłów

Po zakończeniu założonego programu badań stwierdzono brak uszkodzeń zmęczeniowych dźwigara. Szczegółowej inspekcji poddane zostały fragmenty kompozytu w obszarze głównego okucia, w którym również nie zaobserwowano tego rodzaju zmian (rys. 25).



Rys. 25 Stan struktury po zakończonym programie badań

### 10. Podsumowanie

Zrealizowano cały założony program badań, nie obserwując istotnych zmian zarówno w stanie elementów kompozytowych, jak i sztywności struktury. Udowodniono w ten sposób założoną trwałość zmęczeniową dźwigara.



Odtwarzanie powierzchni badanych struktur przy zastosowaniu skanowania przestrzennego pozwala uniknąć konieczności wykonania specjalnego oprzyrządowania, dostarczając dokładnych i prostych do wykonania pomiarów.

Pierwsze doświadczenia z wykorzystania światłowodowych czujników tensometrycznych w badaniach zmęczeniowych struktur kompozytowych, w których pojawiają się wysokie poziomy odkształceń, potwierdzają przydatność tego typu systemu pomiarowego. Zastosowanie tensometrii pozwoliło na zaobserwowanie zjawiska lokalnego, okresowego umacniania się konstrukcji w trakcie trwania eksperymentu.

Przedstawione w pracy rezultaty próby zmęczeniowej nie kończą przewidzianego zakresu badań. Dźwigar zostanie poddany kolejnym cyklom obciążeń, prowadzących do określenia granicznej liczby cykli, odpowiadającej rzeczywistemu czasowi życia badanej struktury kompozytowej.

## Literatura

1. Gassner E, Shutz M. The Significance of Constant Load Amplitude Tests for the Fatigue Evaluation of Aircraft Structures. Amsterdam: Proceedings, Symposium on Fatigue Testing of Aircraft Structures, 1959.
2. Kensche Ch W. Lifetime of GFRP in a shear web and in the girder of a sailplane wing spar. *Technical soaring* 2002; 26(2): 51-55.
3. Kensche Ch W. Proposal for a certification procedure of extended sailplane lifetime. *Technical soaring* 2002; 26(2): 32-43.
4. Maul J, Kipp T. Sensing of surface strain with flexible fiber Bragg strain gages. Darmstadt: HBM GmbH.
5. Rodzewicz M. Problematyka modelowania w badaniach trwałości zmęczeniowej węzła kadłubowego połączenia skrzydło-kadłub szybowca PW-5. Warszawa: Wydawnictwo PTMTiS, Materiały konferencyjne „Mechanika w lotnictwie”, 1994; 473-485.
6. Rodzewicz M. Investigation of the glider load spectra. *Technical soaring* 2007; 31(1): 2-12.
7. Rodzewicz M. Spektra obciążeń i trwałość zmęczeniowa struktury nośnej szybowców kompozytowych. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2008.
8. Rodzewicz M, Przekop A. Experimental investigation of the load spectrum and fatigue tests of the PW-5 World Class Glider. *Technical soaring* 2000; 24: 15.