

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Zielińskiego pt.
„Analiza możliwości zwiększenia dokładności monitorowania zużycia
zmęczeniowego konstrukcji samolotu Su-22 na podstawie danych z pokładowego
rejestratora lotu i systemu monitorowania obciążeń”**

Podstawa opracowania: Pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej z dn. 05.07.2022r.

Wprowadzenie

Samoloty należą do konstrukcji, które poddane są działaniu obciążeń zmiennych w czasie. Specyfika projektowania płatowców (minimalizacja masy, wysoki poziom wytrzymałości materiału, stosowanie konstrukcji cienkościennych podatnych na zjawisko wyboczenia, koncentracja naprężeń wokół otworów pod nity i wykrojów konstrukcyjno-technologicznych) oraz ww. zmienność obciążeń powodują, że głównym zjawiskiem limitującym żywotność samolotu jest zmęczenie materiałów.

Problemy zmęczeniowe były przyczyną wielu katastrof samolotów (np. DH Comet w 1954 r). Aby znaleźć przyczyny przeprowadzono pionierską na owe czasy, pełnoskalową próbę zmęczeniową płatowca z uwzględnieniem sekwencyjnej zmiany ciśnienia w kabinie pasażerskiej. Sukcesywne zwiększanie resursów samolotów spowodowało, że w kolejnych latach producenci samolotów coraz częściej realizowali próby zmęczeniowe płatowca. Próby takie dostarczają wielu ważnych informacji jak np. lokalizacja krytycznych pod względem zmęczeniowym stref płatowca, liczba symulowanych godzin lotu do inicjacji pęknięć oraz prędkość propagacji pęknięć.

Jednym z zagadnień dotyczących eksploatacji płatowca jest monitoring jego zużycia zmęczeniowego. Do niedawna, wyznacznikiem tego zużycia była min. liczba godzin lotu. Jednak podejście to jest mało dokładne, ponieważ liczba godzin lotu nie przekłada się wprost na liczbę cykli obciążenia. Przykładowo, dwa samoloty realizujące to samo zadanie przez

różnych pilotów mogą wykazywać nie tylko różne liczby cykli obciążenia, ale także różne wartości amplitudy naprężeń w krytycznych pod względem zmęczeniowym podzespołach płatowca. Taki stan rzeczy może być spowodowany przez wiele czynników jak np. indywidualne preferencje pilota lub czynniki pogodowe (turbulencja). Jedną z metod, która przyczynia się do dokładniejszego oszacowania zużycia zmęczeniowego samolotu jest zastosowana przez Doktoranta metoda, polegająca na ciągłym pomiarze składowej pionowej przyspieszenia, za pomocą zarówno rejestratora parametrów lotu jak również systemu monitorowania obciążeń (SMO), realizującego pomiar współczynnika przeciążenia n_z oraz odkształceń wybranych elementów płatowca metoda tensometryczną.

Na tle powyższych rozważań stwierdzam, że praca doktorska mgra inż. Wojciecha Zielińskiego pt. „Analiza możliwości zwiększenia dokładności monitorowania zużycia zmęczeniowego konstrukcji samolotu Su-22 na podstawie danych z pokładowego rejestratora lotu i systemu monitorowania obciążeń” wpisuje się we współczesne trendy dotyczące badań i eksploatacji statków powietrznych.

Charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska mgra inż. Wojciecha Zielińskiego liczy 263 strony i składa się z siedmiu rozdziałów. Na wstępie Autor zamieścił streszczenie w języku polskim i angielskim a także wykaz skrótów stosowanych w pracy.

Pracę rozpoczyna wprowadzenie, w którym przedstawiono historię rozwoju samolotu Su-22, jego charakterystykę oraz dane techniczne. Następnie opisano realizowany przez Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych oraz Wojskowe Zakłady Lotnicze nr 2 program mający na celu przedłużenie okresu eksploatacji samolotu, w wyniku którego zwiększono liczbę godzin lotu oraz liczbę lądowań.

W rozdziale drugim przedstawiono analizę stanu wiedzy dotyczącą min. historii badań zmęczeniowych, katastrof lotniczych spowodowanych przez zjawisko zmęczenia materiałów oraz badań zmęczeniowych stosowanych w lotnictwie. Autor opisał następujące metody określania trwałości statków powietrznych: bezpiecznej trwałości (safe-life), bezpiecznego uszkodzenia (fail-safe) oraz tolerowanego uszkodzenia (damage tolerance). W pracy przedstawiono także wybrane zagadnienia z zakresu wytrzymałości zmęczeniowej (metody zliczania cykli obciążenia, kompensacja naprężeń średnich cyklu, model zużycia zmęczeniowego).

W rozdziale trzecim opisano przebieg próby zmęczeniowej samolotu Su-22UM3K, która została zrealizowana w Instytucie Badań Aerodynamicznych w Pradze. Pierwszym etapem niezbędnym do definicji obciążeń było przeprowadzenie prób w locie na samolocie wyposażonym w dodatkowy rejestrator z systemem tensometrycznym oraz skalowanie czujników tensometrycznych. W kolejnej części pracy opisano sposób określenia widma obciążeń oraz realizację próby zmęczeniowej płatowca z uwzględnieniem kilku konfiguracji obciążeń, charakterystycznych dla kołowania, lotu i lądowania. W wyniku przeprowadzonych badań określono krytyczne strefy płatowca (dźwigar skrzydła oraz otwór dostępowy skrzydła), gdzie pojawiły się pęknięcia zmęczeniowe, wykryte po realizacji 6500 symulowanych godzin lotu. Następnie Autor scharakteryzował program przedłużenia eksploatacji samolotów Su-22, opracowany dla Sił Powietrznych RP, oparty na metodzie bezpiecznej trwałości (safe-life) oraz indywidualnym śledzeniu zużycia zmęczeniowego poszczególnych samolotów.

W kolejnym rozdziale zdefiniowano tezę oraz główne cele pracy. Teza pracy głosi że: „Wykorzystanie kombinacji danych z czujników tensometrycznych systemu monitorowania obciążeń oraz informacji z pokładowego rejestratora parametrów lotu pozwala na uzyskanie efektu synergii w zakresie dokładności określenia zużycia zmęczeniowego”. Dodatkowo Autor wskazuje cele szczegółowe, których realizacja pozwoli na udowodnienie ww. tezy pracy

W rozdziale 5 opisano systemy rejestracji Tester U3Ł (montowany seryjnie) i SMO (nowszy system monitorowania obciążeń) zabudowane na samolotach Su-22. Uwagę zwrócono nie tylko na parametry techniczne ww. systemów, ale także na czynniki zewnętrzne, które mogą prowadzić do utraty danych lub do rejestracji danych fałszywych. Wyniki przeprowadzonych analiz wykazały, że współczynnik przeciążenia określony przez Tester U3Ł jest zaniżony w porównaniu z wartością n_z odczytaną z SMO. Autor wskazał, że przyczyną niedoszacowania wartości współczynnika przeciążenia jest zbyt niska częstotliwość próbkowania systemu Tester U3Ł oraz mała dokładność czujnika przyspieszeń, dedykowanego do ww. systemu. Dodatkową wadą systemu Tester U3Ł jest pomijanie niektórych cykli obciążenia w trakcie rejestracji. W pracy przeprowadzono analizę wartości zużycia zmęczeniowego, wyznaczonego dla różnych samolotów na podstawie pomiarów przeciążenia n_z przez rejestratory U3Ł i SMO. Wyniki badań uzyskane przez Autora pracy wskazały, że niedoszacowanie przez system Tester U3Ł

wartości współczynnika przeciążenia oraz zaniżanie rejestrowanych liczby cykli spowodowało znaczne niedoszacowanie zużycia zmęczeniowego (w odniesieniu do analiz wykonanych za pomocą nowszego systemu SMO).

W kolejnej części pracy określono zużycie zmęczeniowe na podstawie danych z pomiaru metodą tensometryczną. Uzyskane wyniki wskazały, że zużycie zmęczeniowe określone ww. metodą może być ponad 2-krotnie większe niż wynik referencyjny (pomiar n_z , SMO). Autor wyjaśnia, że ww. wynik może być obarczony błędem, ponieważ przed tym pomiarem nie zostały wyskalowane kanały tensometryczne. Po wykonaniu skalowania czujników tensometrycznych uzyskano znacznie większą zbieżność wyników. W dalszej części pracy określono zużycie zmęczeniowe dla lotów w różnej konfiguracji płatowca (kąt skosu skrzydeł, mechanizacja, paliwowe zbiorniki podskrzydłowe) oraz kołowania.

W rozdziale 6 zaproponowano metody służące do zwiększania dokładności monitorowania zużycia zmęczeniowego samolotów Su-22. Autor proponuje do realizacji ww. celu metodę polegającą na analizie kombinacji danych z systemów Tester U3L oraz SMO. W przypadku samolotów Su-22 w wersji bojowej, które wyposażone są wyłącznie w Tester U3L, zwiększenie dokładności określenia zużycia zmęczeniowego samolotu może zostać zrealizowane poprzez zastosowanie czujnika przyspieszeń o większej czułości oraz przez zwiększenie częstotliwości zapisu danych.

W rozdziale 7 przedstawiono podsumowanie, wnioski wynikające z realizacji pracy oraz kierunki dalszych badań. Całość opracowania kończy spis literatury liczący 196 pozycji, spis rysunków i tabel oraz załącznik zawierający: dane taktyczno-techniczne samolotu Su-22UM3K, dane lotno-techniczne, lista ostrzeżeń o przekroczeniu dopuszczalnych reżimów eksploatacji oraz alternatywne metody zliczania cykli.

Uważam, że praca zawiera wszystkie składniki typowe dla dysertacji doktorskich, zaś układ pracy jest poprawny.

Ocena pracy

Rozprawa zawiera uzasadnienie wyboru tematyki, przegląd literatury a także określa cele i tezę pracy. W rozprawie wskazano lukę badawczą dotyczącą ograniczonej dokładności stosowanej obecnie metody określania zużycia zmęczeniowego w programie

przedłużania resursu samolotów Su-22, która bazuje na pomiarze współczynnika przeciążenia (n_z) przez system Tester U3Ł. W ramach realizacji pracy Autor zaproponował metodę określenia zużycia zmęczeniowego konstrukcji w oparciu o system monitorowania obciążeń (SMO), który ze względu na min. większą częstotliwość próbkowania cechuje się dokładniejszym pomiarem przyspieszeń (w odniesieniu do systemu Tester). Dodatkowo system SMO posiada możliwość podłączania kanałów tensometrycznych, przez co możliwe jest określenie odkształceń w krytycznych podzespołach płatowca np. w dźwigarze skrzydła. Zaproponowana przez Autora pracy metodyka określania zużycia zmęczeniowego w oparciu o dane z obu ww. systemów daje pełniejsze informacje nt. amplitudy naprężenia oraz zużycia zmęczeniowego elementów płatowca poddanych działaniu obciążeń zmiennych.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć naukowych Autora pracy można zaliczyć:

- analiza porównawcza zużycia zmęczeniowego samolotu Su-22 określonego w oparciu o pomiar współczynnika przeciążenia n_z rejestrowanego przez systemy: Tester U3Ł i system monitorowania obciążeń (SMO).
- analiza wpływu wybranych konfiguracji płatowca (lot z różnym ustawieniem skosu skrzydła, użycie klap i lotek, obecność podwieszanych zbiorników paliwa) oraz operacji naziemnych (kołowanie) na zużycie zmęczeniowe struktury samolotu Su-22
- opracowanie metodyki skalowania tensometrów w oparciu o kombinację danych z dwóch rejestratorów: Tester U3Ł i SMO

Oceniając pracę chciałem zwrócić uwagę na starannie przygotowany i obszerny przegląd literatury zawierający blisko 200 pozycji źródłowych. Autor we wstępie wyjaśnia genezę powstania pracy, która bazuje na programie badawczym dotyczącym przedłużenia okresu eksploatacji samolotów Su-22, użytkowanych w Polsce. Sama praca oraz jej główne cele mogły zostać zrealizowane poprzez wykonanie wielu pracochłonnych i złożonych zadań jak: badania w locie, próba zmęczeniowa samolotu Su-22, skalowanie kanałów tensometrycznych, opracowanie wyników badań, wnioski ilościowe i jakościowe oraz stworzenie nowych procedur do określania zużycia zmęczeniowego płatowca. Zaproponowana metodyka dotycząca zwiększenia dokładności określania zużycia zmęczeniowego samolotu Su-22 stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe Doktoranta w zakresie dyscypliny Inżynieria Mechaniczna. Wyniki uzyskane w pracy mają znaczenie

nie tylko naukowe a także utylitarne. Wdrożenie ww. metodyki może przyczynić się do zwiększania bezpieczeństwa eksploatacji samolotów Su-22 w ramach metody „safe-life” oraz do wymiernych korzyści ekonomicznych, poprzez bezpieczną eksploatację samolotu ponad pierwotny resurs zdefiniowany przez producenta.

W trakcie czytania pracy nasunęło mi się kilka uwag, które przedstawiam poniżej.

Uwagi szczegółowe

1. Na stronie 147 przedstawiono porównanie zużycia zmęczeniowego określonego na podstawie pomiarów współczynnika przeciążenia za pomocą systemów Tester U3Ł i SMO. W analizie porównawczej założono, że poziomem odniesienia jest zużycie zmęczeniowe określone za pomocą pomiaru n_z urządzeniem Tester U3Ł. Skoro Autor wcześniej wykazał, że pomiar n_z za pomocą Tester U3Ł jest obarczony błędami, to dlaczego w obliczeniu względnego zużycia zmęczeniowego jako punkt odniesienia nie zdefiniowano zużycia zmęczeniowego określonego na podstawie pomiarów nowocześniejszym i dokładniejszym rejestratorem SMO? W kolejnych analizach (np. rys. 5.70) referencyjna wartość zużycia zmęczeniowego określona jest na podstawie pomiaru n_z zrealizowanego za pomocą SMO.
2. Autor niepoprawnie tłumaczy sformułowania z literatury anglojęzycznej np. „trudne estymacji przy brakujących danych”, „fatigometr” (str. 54), „uplastycznienie końcówki pęknięcia” (str 65).
3. Na stronie 46 znajduje się sformułowanie „okres do pierwszej inspekcji często wynosi nawet 75% zakładanego czasu eksploatacji konstrukcji”. Proszę o podanie pozycji źródłowej, w oparciu o którą podano ww. czas do pierwszej inspekcji.
4. Interpretacja rysunku 3.18 (str. 93) jest utrudniona, ponieważ na wykresie nie wyskalowano osi poziomej i pionowej.
5. Na stronie 96 zamieszczono niepoprawne sformułowanie „...podwyższenie poziomu bezpieczeństwa eksploatacji starzejącej się techniki lotniczej...” Bezpieczeństwo eksploatacji może dotyczyć konkretnej konstrukcji lub sprzętu np. samolotu, śmigłowca, statków powietrznych itp.

6. Na stronie 168 znajduje się niezrozumiałe sformułowanie „....skalowanie tensometrów w nominalnie identycznych miejscach...”

Podsumowanie i wniosek końcowy

Uważam, że tematyka rozprawy mieści się w zakresie dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna. Z analizy treści rozprawy wynika, że Autor posiada umiejętność prowadzenia samodzielnej pracy badawczej oraz potrafi dokumentować wyniki badań. Dodatkowo posiada wiedzę i umiejętności w zakresie badań doświadczalnych, wytrzymałości i zmęczenia materiałów oraz technik eksploatacji. Pomimo wyszczególnionych wyżej uwag pracę oceniam pozytywnie.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa pt. „Analiza możliwości zwiększenia dokładności monitorowania zużycia zmęczeniowego konstrukcji samolotu Su-22 na podstawie danych z pokładowego rejestratora lotu i systemu monitorowania obciążeń” spełnia wymagania określone w art. 187, ustawy z dnia 18 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i wnoszę o dopuszczenie mgra inż. Wojciecha Zielińskiego do publicznej obrony Jego rozprawy.

dwitek