

SZTYWNOŚĆ I UTRATA SZTYWNOŚCI KONSTRUKCJI LOTNICZYCH

WITOLD WIŚNIEWSKI
Instytut Lotnictwa

Streszczenie

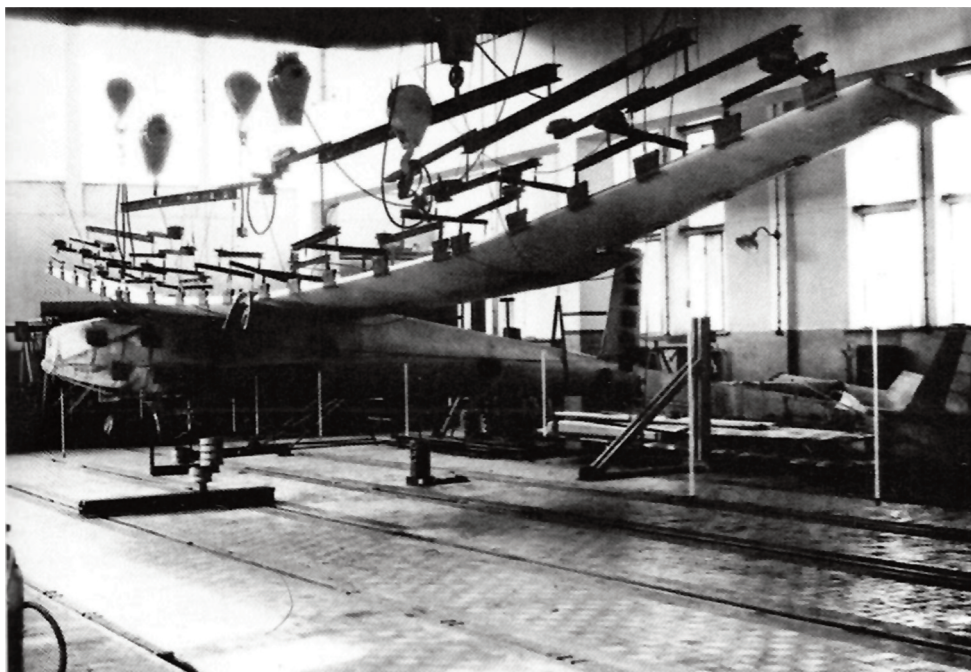
Sztywność spełnia fundamentalną rolę w zapewnieniu integralności i funkcjonalności konstrukcji. W budowie statków latających istnieje konieczność doboru właściwej sztywności, która zapewniłaby odpowiednią wytrzymałość konstrukcji przy możliwie małej masie. Dlatego sztywność konstrukcji lotniczych często jest parametrem decydującym, który w przypadku błędów produkcyjnych lub zmniejszenia sztywności mogących wystąpić w eksploatacji, prowadzi do katastrof lub awarii.

W pracy przytoczono te przykłady i sposoby, które zastosowano w celu zapewnienia bezpieczeństwa i integralności konstrukcji.

1. Wprowadzenie

Sztywnością konstrukcji nazywa się zdolność do przeciwstawienia się deformacjom. Zależy ona od właściwości materiałów i konfiguracji struktury (sposobu przyłożenia sił i momentów). W praktyce sztywność struktury określa się za pomocą współczynników sztywności będących stosunkiem wartości przemieszczenia do wartości siły to przemieszczenie wywołującej.

„Znane są samoloty niesztywne, albo raczej mało sztywne, które dają się eksploatować, ale brak dostatecznej sztywności ogólnie rzecz biorąc jest niepożądana. Pociąga za sobą dużo niebezpieczeństw, które są możliwe do zneutralizowania, ale często kosztem dużej zręczności konstruktora i dużej liczby obliczeń i prób” Tadeusz Sołtyk [1].



Rys. 1. Próby statyczne i sztywnościowe szybowca



Rys. 2. Próby rezonansowe samolotu I-22 Iryda

W zjawiskach dynamicznych sztywność można wyrazić za pomocą częstości drgań rezonansowych. Drgania rezonansowe bada się w ramach prób rezonansowych polegających na harmonicznym wzbudzeniu i pomiarze częstości i postaci drgań rezonansowych [9].

Statek powietrzny nie może być jednak „dowolnie” sztywny ze względu na konieczność posiadania możliwie najmniejszej masy własnej. Musi być „jedynie” na tyle sztywny, aby nie mogły wystąpić na nim niebezpieczne zjawiska o charakterze statycznym lub dynamicznym.

W celu wyeliminowania niebezpiecznych zjawisk o charakterze statycznym, sztywności określonych elementów muszą być większe od sztywności krytycznych obliczonych, zmierzonych lub przyjętych na podstawie przepisów. Niebezpiecznym zjawiskom o charakterze dynamicznym można zaradzić kształtując strukturę tak, aby takie niekorzystne stany występowały poza zakresem eksploatacji.

2. Przegląd zjawisk w których sztywność konstrukcji decyduje o jej integralności i bezpieczeństwie

Sztywność struktury oraz układów sterowania odgrywa decydującą rolę w zapewnieniu integralności i bezpieczeństwa statków powietrznych.

Zjawiska które mogą zagrozić integralności i bezpieczeństwu statku powietrznego można uporządkować w grupach.

- a. Przekroczenie obciążeń przyjętych jako wymiarujące przy projektowaniu danego typu statku powietrznego zarówno w locie jak i podczas manewrów na ziemi.
- b. Wystąpienie zjawisk typu aeroelastyczności statycznej na skutek niewystarczających sztywności struktury lub układów sterowania, a są to:
 - rozbieżność skrętna (dywergencja) skrzydeł lub stateczników
 - odwrotne działanie sterów (rewers)
 - niestateczność statyczna samolotów odkształcalnych
- c. Wystąpienie drgań mechanicznych takich jak:
 - rezonans naziemny wymuszany przez wirnik nośny śmigłowca
 - rezonans powietrzny wymuszany przez wirnik nośny śmigłowca
 - inne typy rezonansów wymuszanych przez podzespoły wirujące
 - drgania wymuszane akustycznie
 - drgania wymuszane spływającymi lub pękającymi wirami
 - drgania podwozi (shimmy)
- d. Wystąpienie drgań aeroelastycznych takich jak:
 - flutter giętno – skrętny skrzydeł lub usterzenia
 - flutter lotek, sterów, klap i kłapek
 - inne rodzaje flutterów
 - buffeting

3. Przykłady zdarzeń lotniczych których przyczyną był brak dostatecznej sztywności lub rozsztywnienie

- Na samolotach bombowych Handley Page oraz De Havilland DH-9 wystąpił flutter. Zjawisko usunięto dzięki usztywnieniu tyłu kadłuba oraz usterzenia (1914 rok).
- Buffeting usterzenia był przyczyną rozpadnięcia się samolotu Junkers w Meoplan w Anglii (w chmurze) w roku 1920. [5]
- Zmniejszenie sztywności konstrukcji skrzydła spowodowane rozmiękczeniem sklein wskutek przesiąknięcia skrzydeł paliwem - było przyczyną flutteru samolotu Fokker F-10 Trimotor w 1931 roku.
- Niedostateczna sztywność skrzydeł na skręcanie była przyczyną ukręcenia lub flutteru samolotu RWD-6. Skrzydła usztywniono stosując drugi dźwigar i drugi zestrzał.
- Flutter lotek samolotu Gee Bee R-2 usunięto dzięki zastosowaniu wyważenia masowego lotek.
- Zbyt mała sztywność skrzydeł na skręcanie - była przyczyną urwania się skrzydeł samolotu RWD-6 i śmierci Franciszka Żwirko i Stanisława Wigury.
- Zjawiska aeroelastyczne były przyczyną utraty obydwu lotek w trakcie nurkowania samolotu P-7/M w 1932 roku pilotowanego przez Bolesława Orlińskiego – samolot zachował równowagę więc pilot mógł wyskoczyć na spadochronie.
- Odkształcenie się skrzydeł uniemożliwiło wyprowadzenie z nurkowania w locie odwróconym samolotu PWS-12 w roku 1933.
- Wybudowanie się jednego z silników z łoża było przyczyną katastrofy samolotu LWS-4 Żubr w roku 1936.
- Szybowiec Sokół rozsypał się w powietrzu podczas próby pętli odwróconej.
- Flutter samolotu PZL Karaś usunięto przez wydłużenie kadłuba.
- Rozsypanie się usterzenia ogonowego podczas lotu nurkowego prototypu samolotu RWD-14 Czapla miało miejsce w roku 1937.
- Brak odpowiedniego usztywnienia wykroju stanowiska dla tylnego strzelca był powodem drgań w postaci skręcanie kadłuba typu buffeting na samolocie PZL Wilk. Wykrój usztywniono.
- Usztywnienie konstrukcji pozwoliło na usunięcie dywergencji (aerodynamicznego statycznego ukręcania) skrzydeł samolotu Fokker D-VIII.
- Łopaty WN obcięły belkę ogonową śmigłowca SP-GIL w 1953 roku.
- Zła regulacja tłumika drgań typu shimmy była powodem pęknięć przednich goleni samolotu Junak-3.
- Flutter lotek samolotu Junak usunięto poprzez wprowadzenie mas wyważających – wcześniej pilot Antoni Szymański wylądował w polu po skoku ze spadochronem doznając poważnej kontuzji.
- Na prototypie samolotu TS-8 Bies miało miejsce oderwanie się jednej łopaty śmigła i wybudowanie całego silnika w 1957 roku. [3]
- W następstwie flutteru uległ zniszczeniu w locie szybowiec Mucha 100. [4]
- Poluzowanie linki napędu klapki wyważającej – było przyczyną bardzo dużych drgań usterzenia poziomego, wyeksploatowanego samolotu „Morawa”.
- Obniżenie sztywności na skutek zmęczeniowego pęknięcia ścianki dźwigara statecznika było przyczyną tragicznego w skutkach flutteru samolotu MD-12.



Rys. 3. Prototyp samolotu MD-12



Rys. 4. Szczątki prototypu samolotu MD-12 po katastrofie.



Rys. 5. Pomyślne lądowanie prototypu TS-8 Bies po utracie silnika

- Oderwanie skrzydła miało miejsce podczas pomiaru drgań struktury szybowca SZD-21 Kobuz w 1963 roku.
- Maksymalna prędkość samolotu TS-11 Iskra ogranicza sztywność skrętną skrzydła powodującą spadek stateczności lotek.
- Zakleszczenie się lotki było przyczyną niewyprowadzenia z korkociągu szybowca SZD-30 Pirat w 1966 roku.
- Zbieżność częstości drgań o postaci kadłub – pylon był przyczyną rezonansu powietrznego śmigłowca, rozwiązaniem było odsztywnienie lub zastosowanie tłumika, wybrano to drugie.
- Spadek sztywności końca kadłuba na skutek zniszczenia obluźwanych nitów, pęknięcia zmęczeniowego lub ukrytej wady materiałowej - był przyczyną niekontrolowanej zmiany kąta natarcia statecznika poziomego i jego dużych drgań, w wyniku czego doszło do katastrofy prototypu samolotu I-22 Iryda. [7]
- Zbieżność częstości i niskie tłumienie drgań o postaci zginanie steru były powodem pęknięć zmęczeniowych na skutek wymuszeń akustycznych I-22 Iryda.
- Luzy układu sterowania lotką były przyczyną flutteru samolotu amerykańskiego F-117 w 1997 roku – usztywniono układ siłownika sterolotki.
- Nietrzymanie warunków technologicznych procesu utwardzania sklein kompozytów było przyczyną odpadnięcia w locie prawego skrzydła samolotu UL Sky Cruiser 8 w 2006 roku.

4. Zmiany konstrukcyjne jakie zastosowano w celu usunięcia przyczyn niepożądaných zdarzeń

W większości wymienionych w punkcie 4 przypadków, podjęto działania, w wyniku których usunięto przyczyny niebezpiecznych zdarzeń. Działania te można przedstawić w trzech grupach:

a) Wprowadzenie zmian konstrukcyjnych mających na celu usztywnienie niektórych zespołów i elementów konstrukcji. Sztywność kadłubów zwiększano poprzez zastosowanie grubszego poszycia, zaślepiania otworów i wykrojów lub usztywnianie ich brzegów. Ten rodzaj działań mógł prowadzić do obniżenia częstości i rezonansów o postaciach „zginanie kadłuba”.

Bardziej skutecznym, chociaż nie zawsze możliwym sposobem usztywniania kadłuba byłoby zwiększenie jego przekroju poprzecznego.

Sztywność skrętną skrzydeł zwiększono także poprzez zastosowanie grubszego poszycia. W jednym przypadku zastosowano dodatkowe zastrzały. Skuteczniejsze w skutkach zwiększenie przekroju poprzecznego skrzydła oznaczałoby praktycznie konieczność budowy samolotu od początku.

Układy sterowania usztywniano poprzez eliminowanie luzów, oraz stosowanie bardziej sztywnych elementów: zamiast linek wprowadzano bardziej sztywne układy popychaczy, a jeśli popychacze były za mało sztywne wprowadzano układy hydrauliczne.

b) Odsunięcie częstości wzbudzania od częstości rezonansu reagującego na to wzbudzenie. W takim przypadku nie zawsze jest możliwe zmienianie częstości wzbudzania. Pozostają więc dwa rozwiązania: zastosowanie eliminatorów drgań lub zmiana częstości kłopotliwego rezonansu. W prezentowanych przypadkach taką zmianę uzyskano dzięki:

- zwiększeniu długości kadłuba, co spowodowało obniżenie częstości rezonansu kadłuba,
- usztywnienie wykroju na kabinie pilotów, co spowodowało podwyższenie częstości rezonansu kadłuba,
- zwiększeniu grubości poszycia skrzydła, które spowodowało podwyższenie częstości jego skręcania,
- dodaniu masy na końcu wału wirnika nośnego śmigłowca, co spowodowało obniżenie częstości rezonansu pierwotnie wzbudzanego przez harmoniczną obrotów wirnika.

c) Wyważanie masowe polegające na przesunięciu środka ciężkości skrzydeł, stateczników, lotek i sterów przed oś przyłożenia wypadkowych sił aerodynamicznych. Dzięki wyważeniom masowym uzyskiwano efekt przeciwdziałania sił bezwładności siłom wzbudzania aerodynamicznego. Wyważanie masowe polega na umieszczeniu w noskach sterów i lotek mas wyważających.

Do wyważenia skrzydeł najczęściej stosowano wysięgniki z masą. Przykład wyważenia antyflutterowego skrzydła samolotu TS-11 Iskra pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Wyważenie masowe samolotu TS-11 Iskra.

5. Podsumowanie

Sztywność spełnia fundamentalną rolę w zapewnieniu integralności i funkcjonalności konstrukcji. W lotnictwie istnieje konieczność eksperymentowania ze sztywnością ze względu na potrzebę minimalizowania masy statków powietrznych. Niebezpieczne wypadki są efektem niewystarczających sztywności statycznych, niewłaściwych sztywności dynamicznych oraz skutków różnych przypadków rozszywnień. Niewystarczające sztywności statyczne dotyczą najczęściej sztywności skrętnej skrzydeł. Wady konstrukcyjne, pęknięcia i inne usterki eksploatacyjne prowadzą do zmniejszenia sztywności statycznej oraz obniżania częstości drgań rezonansowych. Przyczyną rozszywnienia może być wystąpienie:

- pęknięć doraźnych
- pęknięć zmęczeniowych
- poluzowania nitów
- wzrostu luzów w układach sterowania
- utraty stateczności elementów struktury lub układów sterowania
- rozklejenia lub nasiąknięcia wodą, smarami i paliwem
- kolizji z ciałami obcymi
- przestrzeleń

6. Literatura

1. Sołtyk Tadeusz; „*Błędy i doświadczenia w konstrukcji samolotów*”, Warszawa, WKŁ, 1986 r.
2. Wiśniewski Marian, Witkowski Ryszard; „*Badania w locie w Instytucie Lotnictwa*”; Biblioteka historyczna Instytutu Lotnictwa, Warszawa, 2010 r.
3. Grzegorzewski Jerzy, Królikiewicz Tadeusz; „*80 lat Instytutu Lotnictwa*”, Warszawa, 2006 r.
4. Bojanowski Julian; (praca niepublikowana), Warszawa, 2011 r.
5. Dulęba Leszek, Glas Andrzej; „*Samoloty RWD*”, WKŁ, Warszawa, 1983 r.
6. Goraj Zdobysław; „*Dynamika i aerodynamika samolotów manewrowych z elementami obliczeń*”, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa, 2001 r.
7. Baron Alfred; „*Samolot szkolno-bojowy I-22 Iryda – wymagania, realizacja, ocena*”, Biblioteka historyczna Instytutu Lotnictwa, Warszawa, 2010 r.
8. Sołtyk Tadeusz; „*Amatorskie projektowanie samolotów*”, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa, 1995 r.
9. Wiśniowski Witold; „*Badania rezonansowe obiektów latających – metody i analiza wyników*”, Prace Instytutu Lotnictwa nr 209, Warszawa, 2010 r.
10. Dul Franciszek; Wykłady aeroelastyczności, Politechnika Rzeszowska, 2010 r.
11. Chajec Wojciech; „*Wykorzystanie pomiarów rezonansowych do analizy flutteru samolotu po zmianie rozkładu masy*”, Rozprawa doktorska Politechnika Warszawska wydz. MEiL, Warszawa, 2011 r.
12. Wiśniowski Witold, Żurkowski Lech; „*Porównanie kryteriów sztywności wg. BCAR i AP-970*”, Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa.

WITOLD WIŚNIEWSKI
Institute of Aviation

STIFFNESS AND THE LOSS OF STIFFNESS IN AIRCRAFT STRUCTURES

Summary

Stiffness fulfills a fundamental role in ensuring the integrity and functionality of the structure. In aircraft manufacturing, there is a need for selection of the proper stiffness, which would provide adequate structural strength with the weight of structure as low as possible. Therefore, stiffness of aircraft structure is often a crucial parameter, which in the case of manufacturing errors or stiffness lowering that may occur in the operation, are leading to disasters or accidents.

The paper quoted the examples and methods that were used to ensure the safety and structural integrity of design.