



Article citation info:

Golda, P., Konieczka, R. The nature of the main structural damage in Boeing 737-400 as identified during overhaul type C. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2016, **90**, 71-89. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858/sjsutst.2016.90.7.

Piotr GOLDA¹, Robert KONIECZKA²

THE NATURE OF THE MAIN STRUCTURAL DAMAGE IN BOEING 737-400 AS IDENTIFIED DURING OVERHAUL TYPE C

Summary. In its preliminary part, the article characterises Boeings 737-400 as due to undergo further tests as well as the basic materials used in their construction. It also defines to what extent these materials are prone to damage in the course of their regular use over the planes' working lives. The object of the analysis is the most prevalent structural damage to the fuselage of the planes discovered during overhaul type C and the definition of the best preventive service. Further on the article categorises the discovered problems and provides their genesis. The main part of the article is devoted to the definition of the sources and reasons for the damage. Consequently, the article forms guidelines how to prevent the occurrence of such and similar damage to the fuselage.

Key words: damage, overhaul, structural damage, passenger plane, corrosion, preventive maintenance

ISTOTA GŁÓWNYCH USZKODZEŃ STRUKTURY SAMOLOTU BOEING 737-400 IDENTYFIKOWANYCH PODCZAS PRZEGLĄDÓW TYPU C

Streszczenie. W części wstępnej artykułu zostały scharakteryzowane samoloty typu Boeing 737-400 jako obiekty dalszych badań oraz podstawowe materiały użyte w ich budowie. Jednocześnie określono podatność tych materiałów na

¹ Faculty of Transport, The Silesian University of Technology, Krasińskiego 8 Street, 40-019 Katowice, Poland, e-mail: golda.piotr@gmail.com.

² Faculty of Transport, The Silesian University of Technology, Krasińskiego 8 Street, 40-019 Katowice, Poland, e-mail: robert.konieczka@polsl.pl.

uszkodzenia zaistniałe w toku eksploatacji. Przedmiot badań stanowią uszkodzenia strukturalne kadłuba samolotu wykryte podczas przeglądów typu C, jako najbardziej szczegółowych i skutecznych rodzajów obsług. Przedmiotem dalszej analizy są rodzaje wykrytych uszkodzeń strukturalnych kadłuba samolotu oraz ich geneza. Główną część artykułu stanowi określenie źródeł i przyczyn powstania przedmiotowych uszkodzeń. Jednocześnie jest to przesłanka do dalszego określenia właściwej profilaktyki w celu zapobiegania powstawaniu takich i podobnych uszkodzeń samolotu.

Słowa kluczowe: uszkodzenie, przegląd, uszkodzenie strukturalne, samolot pasażerski, korozja, profilaktyka

1. CHARAKTERYSTYKA SAMOLOTU I MATERIAŁÓW UŻYTYCH DO JEGO BUDOWY

1.1. Boeing 737-400 – podstawowe informacje

Boeing 737 to rodzina obecnie najpowszechniej używanych w skali światowej wąskokadłubowych samolotów pasażerskich średniego zasięgu (rys. 1). Od 1967 roku, kiedy to rozpoczęto produkcję pierwszej wersji modelu 737, wyprodukowano i dostarczono 8350 samolotów w różnych wersjach, a dalszych 4299 jest zamówionych [14]. Popularność tych maszyn jest tak wielka, że szacuje się, iż w każdej chwili w powietrzu znajduje się około 1250 Boeingów 737, a co 5 sekund jeden z nich ląduje lub startuje [16]. Takie dane wskazują jednoznacznie jak udaną i ponadczasową konstrukcją jest ten model.



Rys. 1. Boeing 737-400 w barwach amerykańskich linii lotniczych Alaska Airlines [10]

Boeing 737-400, jako obiekt badawczy przedstawiony w niniejszym artykule, produkowany był w latach 1988-2000. Powstało łącznie 489 sztuk, z czego 266 nadal pozostaje w eksploatacji [14]. Wersja 400 jest największa spośród wersji *Classics* - długość 36,4 m, rozpiętość skrzydeł 28,88 m (bez wingletów), wysokość statecznika pionowego 11,1 m, szerokość kabiny pasażerskiej 3,76 m. Maksymalna masa startowa samolotu wynosi 65 t, przy czym masa własna konstrukcji bez paliwa to 34564 kg [12][14]. W konfiguracji z jedną klasą samolot ten zabiera na pokład maksymalnie 174 pasażerów, 2 pilotów oraz 4 członków załogi kabinowej [14]. Konstrukcję płatowca samolotu Boeing 737-400 określić można jako półskorupową metalową. Udział kompozytów w strukturze konstrukcyjnej

w wersjach *Classics* jest znikomy i sprowadza się do użycia materiałów niemetalowych lub na osnowie metalowej w budowie części owiewek, paneli dostępowych i osłon, które nie przenoszą obciążeń. Ich celem jest minimalizowanie oporów aerodynamicznych.

1.2. Materiały metalowe użyte w konstrukcji

Postęp osiągnięty w dzisiejszym lotnictwie jest możliwy w głównej mierze dzięki opracowywaniu i wdrażaniu do produkcji statków powietrznych nowych materiałów konstrukcyjnych. Boeing 737-400 jest konstrukcją wprowadzoną w latach 80. XX wieku. Bazuje ona na starszych wersjach modelu 737. Te wykorzystują wiele rozwiązań i materiałów stosowanych w modelu 727. Można zaryzykować stwierdzenie, że omawiany samolot pasażerski eksploatowany jest z sukcesami do dziś, choć zawiera w sobie rozwiązania konstrukcyjne o półwiecznej historii. Mimo rosnącego użycia materiałów niemetalowych (przede wszystkim kompozytów) po 1980 roku, Boeing 737-400 ma układ wytrzymałościowy w całości metalowy. Obok stopów aluminium, które są podstawowymi materiałami użytymi w budowie struktury płatowca i stanowią około 75% wszystkich użytych materiałów, zastosowane zostały stopy tytanu, stali węglowe, stopowe i nierdzewne oraz w niewielkim stopniu stopy magnezu i niklu [6].

Stopy aluminium są szeroko wykorzystywane jako materiał konstrukcyjny nie tylko w lotnictwie. Lepsze własności mechaniczne w porównaniu do czystego aluminium przeciwstawione są utracie dobrej odporności na korozję oraz przewodności elektrycznej. Stopy aluminium powszechnie klasyfikuje się według norm ASTM, a więc według składu chemicznego stopu [4]. W budowie samolotu Boeing 737-400 oraz ogólnie w lotnictwie wśród stopów aluminium dominują durale – seria 2000 – oraz superdurale [2] – seria 7000 [4].

Duraluminium to stop aluminium z miedzią i dodatkiem magnezu. Należy do stopów umacnianych wydzieleniowo. Wraz ze wzrostem ilości miedzi rośnie wytrzymałość i maleje plastyczność stopu. Największą wadą duraluminium jest niska odporność na korozję ze szczególną skłonnością do korozji naprężeniowej [4]. Durale są stopami niekujnymi oraz trudno spawalnymi [2]. Typowym przedstawicielem, najczęściej wykorzystywanym w budowie płatowca samolotu Boeing 737-400, jest stop AW 2024-T3. Wykonane jest z niego pokrycie kadłuba, dolne pokrycie skrzydeł, dolne pasy dźwigarów skrzydłowych, część ich ścianek oraz rozpórek, podłogi w lukach bagażowych i elementy wręg [7].

Superduraluminium, inaczej duraluminium cynkowe, to stop aluminium z cynkiem i dodatkiem magnezu. Należy do stopów umacnianych wydzieleniowo. Charakteryzuje się najwyższą wytrzymałością ze wszystkich stopów aluminium, jednak mniejszą plastycznością, szczególnie w kierunku poprzecznym do włókien walcowniczych i większą kruchością [2]. Podobnie jak zwykle duraluminium jest bardzo podatne na korozję, ale w przeciwieństwie do niego poddaje się kuciu [1]. W samolocie Boeing 737-400 najszerzej wykorzystany jest stop AW 7075-T6. Wykonane są z niego główne elementy układu wytrzymałościowego płatowca, a więc podłużnice, główne elementy wręg, żebra, górne pasy dźwigarów, górne pokrycie skrzydła, belki podłogowe (również w lukach bagażowych), belka kilowa oraz, w postaci kutej, większość mocowań, dźwigar wspornikowy podwozia głównego i część elementów pylonu [7].

W konstrukcjach lotniczych stal nie jest wykorzystywana zbyt często ze względu na dużą gęstość – żelazo należy do metali ciężkich [2], co może skutkować istotnym wzrostem masy konstrukcji. Ze stali wykonywane są jedynie elementy poddawane największym obciążeniom w konstrukcjach lotniczych, gdzie wymagana jest wysoka wytrzymałość. W lotnictwie używane są stale konstrukcyjne węglowe, stopowe, nierdzewne, łożyskowe i specjalne (np. sprężynowe).

Stale stopowe użyte w budowie płatowca samolotu Boeing 737-400 należą do stali o zwiększonej wytrzymałości. W konstrukcji najczęściej występuje stop 1.4340 (inne oznaczenie BSS154). Wykonanych jest z niego większość elementów podwozia, zarówno głównego, jak i przedniego, a więc osie, golenie, zastrzały oraz elementy wręg wzmocnionych i elementy siłowe mechanizacji skrzydła [7].

Stale nierdzewne są, w gruncie rzeczy, stalami stopowymi o wysokiej zawartości chromu (do 18%). Chrom jako składnik stopowy w ilościach ponad 11,5% w stopie zaczyna tworzyć na powierzchni materiału tlenki chromu i tym samym nie dopuszcza działania tlenu do związków żelaza, gwarantując odporność na korozję [2]. Stale nierdzewne, jako stale wysokostopowe, mają niewielką ilość węgla i charakteryzują się bardzo wysokimi wytrzymałościami i twardością, jednak są przez to bardziej kruche od stali niskostopowych [4]. Przedstawicielem tej grupy, występującym w konstrukcji płatowca samolotu Boeing 737-400, jest stop 15-5 PH. Wykonane są z niego elementy podwozia, liczne elementy wytrzymałościowe pylonu oraz elementy wzmacniające, np. w dźwigarach i mocowaniach skrzydeł. Stop ten jest jednym z najbardziej wytrzymałych i twardych materiałów użytych w konstrukcji tego samolotu [7].

Stopy tytanu obecnie są szeroko stosowane w konstrukcji cywilnych statków powietrznych, często jako alternatywa do cięższej stali. Dzięki możliwości pracy w umiarkowanie wysokiej temperaturze (nawet do 550°C), stopy tytanu wykorzystywane są w budowie silników turbinowych. Najbardziej rozpowszechnionym w samolocie Boeing 737-400 jest stop Ti-6Al-4V, który jest zarazem „praojcem” większości stopów tytanu [3]. Wykorzystywany jest zarówno w silniku, jak i w konstrukcji płatowca, między innymi w elementach wzmacniających mocowania, np. dźwigara wspornikowego podwozia głównego do tylnego dźwigara skrzydła oraz w strukturze pylonu; w postaci blach wykonane są z niego progi drzwi wejściowych, serwisowych oraz luków bagażowych [7].

Stopy magnezu i niklu mają bardzo niewielki udział w budowie płatowca. Stopy magnezu (np. AZ80), ze względu na niską masę, wykorzystywane są głównie jako materiał na obudowy różnego rodzaju agregatów (np. pomp), stopy niklu z kolei, ze względu na możliwość pracy w wysokich temperaturach, używane są w konstrukcji silników turbinowych.

Własności mechaniczne materiałów określają ich odporność na oddziaływanie sił zewnętrznych, które to generują powstawanie większości uszkodzeń strukturalnych. W przypadku oddziaływań fizykochemicznych oraz elektrochemicznych, których skutkiem jest korozja, mamy do czynienia ze stopniowym obniżaniem własności mechanicznych materiału aż do jego zniszczenia. Odporność metalu bądź stopu na korozję określona jest przez jego skład chemiczny i pozycję w szeregu napięciowym, w odniesieniu do wodorowej elektrody standardowej, dla której potencjał jest równy zero [1].

Poprawna identyfikacja uszkodzenia korozyjnego podczas inspekcji statku powietrznego, ustalenie rodzaju materiału, stopnia korozji i jej rodzaju daje gwarancję dalszego, poprawnego działania. Zależnie od rodzaju materiału metalowego, z którego wykonany jest uszkodzony element, produkty korozji i jej rodzaje różnią się od siebie. Informacje te, na podstawie danych zawartych w instrukcji obsługi technicznej samolotu Boeing 737-400, zebrano w tabeli 2.

Tab. 1

Porównanie podstawowych własności mechanicznych wybranych materiałów metalowych.

$R_{p,0,2}$ – umowna granica plastyczności, R_m – wytrzymałość doraźna (na rozciąganie),
 E – moduł sprężystości wzdłużnej (Younga), A - wydłużenie, H – twardość w metodzie
 Brinella (B) i/lub Rockwella (R) [5, 9, 13, 15]

Material	$R_{p,0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	E [GPa]	A [%]	HB, HR
AW2024-T3	345	483	73,1	18	HB 120 HRA 45 HRB 75
AW7075-T6	503	572	71,7	11	HB 150 HRA 53 HRB 87
1.4340	710	1100	170	13	HRC 35
15-5 PH H900	1385	1438	160	10	HRC 46
Ti-6Al-4V	862	931	113,8	15	HRC 35
AZ80	275	380	44,8	7	HRA 35 HRB 50

Tab. 2

Korozja metali występujących w strukturze statku powietrznego Boeing 737-400 [6]

Material	Rodzaje korozji, na które materiał jest szczególnie podatny	Produkty korozji
Stopy aluminium	Korozja powierzchniowa, wżerowa, galwaniczna, naprężeniowa z pękaniem zmęczeniowym, międzykrystaliczna z łuszczeniem materiału	Pył w kolorach białym do szarego, porowata, ciemna powierzchnia materiału
Stale stopowe	Korozja powierzchniowa, wżerowa, międzykrystaliczna	Brunatnoczerwona powierzchnia materiału i pył
Stale nierdzewne	Dobra odporność na korozję, obniżenie odporności w słonej wodzie i przy głębokich uszkodzeniach powierzchni, korozja szczelinowa, wżerowa	Porowata powierzchnia, czasami plamy w kolorach brunatnoczerwonych
Stopy tytanu	Bardzo dobra odporność na korozję, może powodować korozję galwaniczną aluminium, korozja chemiczna w wyższych temperaturach w postaci tlenków na powierzchni	Brak widocznych produktów korozji w niskich temperaturach, powyżej 371°C tlenki w kolorach od niebieskiego do czarnego
Stopy magnezu	Głęboka korozja wżerowa, wżerowo-naprężeniowa	Biały pył i plamy na powierzchni
Stopy niklu	Dobra odporność na korozję, obniżenie odporności w słonej wodzie, korozja wżerowa	Zielony pył

Stopy aluminium, a więc przede wszystkim duraluminium i superduraluminium, są podstawowym budulcem struktury samolotu Boeing 737-400. Z tego względu oraz dlatego, że stopy aluminium są bardzo podatne na korozję elektrochemiczną, niemal wszystkie uszkodzenia korozyjne identyfikowane w strukturze płatowca dotyczą właśnie tych materiałów.

2. BADANIA I ANALIZA USZKODZEŃ SAMOLOTU

2.1. Obiekty badań

Wszystkie dane przedstawione dalej to autentyczne dane dotyczące samolotów i ich uszkodzeń. Pochodzą one z funkcjonującej Organizacji Obsługowej, która ma certyfikat EASA Part 145. Są to dane poufne i z tego też względu nie zostaną ujawnione nazwa organizacji, operatora, znaki rejestracyjne samolotów ani inne informacje, mogące pozwolić na identyfikację organizacji lub jej klientów. Stanowiło to warunek udostępnienia danych obsługowych. Z tych powodów poszczególnym samolotom nadano odrębne oznaczenia literowe, tylko na potrzeby prowadzonych badań.

W celach porównawczych w tabeli 3 zebrano szczegółowe dane na temat obiektów badań, pochodzące z dokumentów poświadczenia obsługi statków powietrznych (CRS), wystawionych po danym przeglądzie oraz informacji powszechnie dostępnych w źródle [11].

Tab. 3

Informacje na temat obiektów badań. [8, 11]

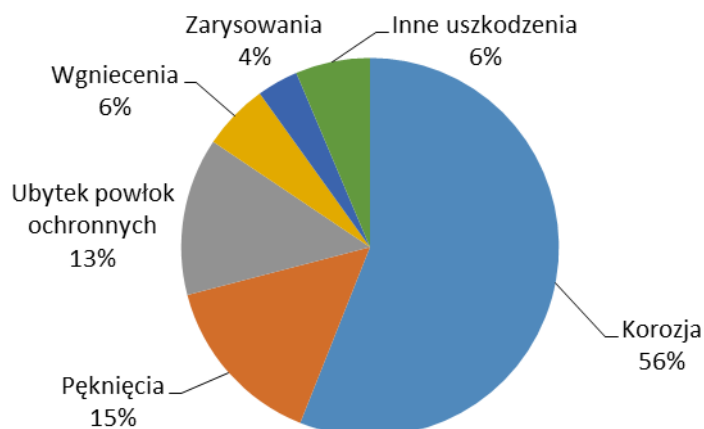
Samolot	Wiek	Nalot	Liczba wykonanych cykli lądowań	Poprzedni operator
A	21 lat	48 021 godzin	39 140	Asiana Airlines
B	23 lata	56 807 godzin	27 820	Blue Air
C	22 lata	59 342 godziny	26 461	Corendon Air
D	19 lat	50 461 godzin	34 025	Malaysia Airlines
E	20 lat	49 028 godzin	30 481	Air One

2.2. Statystyka uszkodzeń

Wyniki pochodzące z opracowania zestawienia uszkodzeń strukturalnych przedstawione zostały w formie wykresów kołowych.

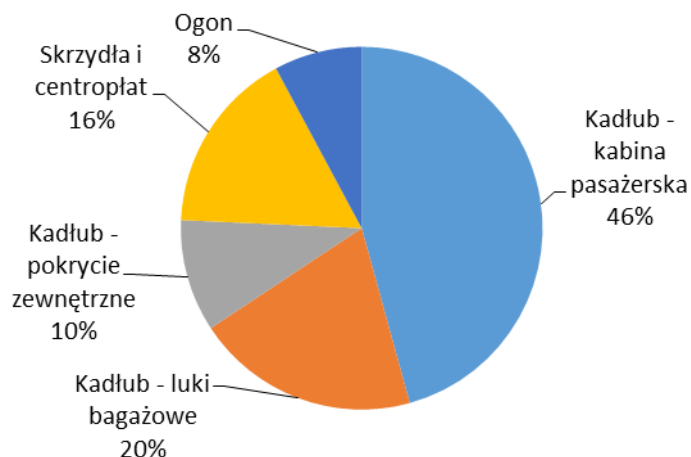
Spśród 140 usterek [8] zdefiniowanych przez personel obsługowy na przedmiotowych samolotach (rys. 2), ponad połowę stanowiły uszkodzenia korozyjne. Wskazuje to na proces starzenia się statku powietrznego jako na główny czynnik kształtujący powstające uszkodzenia strukturalne oraz niezawodność samolotu. Relatywnie duża liczba usterek związanych z uszkodzeniem lub brakiem antykorozyjnych powłok ochronnych może mieć źródło w niewystarczającym zabezpieczeniu powierzchni materiału, nieadekwatnym do lokalizacji elementu lub niskiej jakości wykonania tego zabezpieczenia. Miejsca takie zazwyczaj stanowią ogniska korozji, stąd tak ważne jest ich szybkie identyfikowanie i usuwanie tych usterek. Pewną ciekawostką jest niska liczba uszkodzeń o podłożu zmęczeniowym, co może świadczyć zarówno o bardzo dobrej obsłudze technicznej prowadzonej przez poprzednich operatorów, o doskonałości konstrukcji, jak i prawidłowym użytkowaniu. Stwierdzono natomiast stosunkowo dużo uszkodzeń powstałych na skutek oddziaływania mechanicznego na strukturę samolotu, szczególnie na jego pokrycie zewnętrzne w formie dużej ilości wgnieceń. Pojawiały się również przebicia i zarysowania,

przy czym te drugie stanowią mogą zarówno ognisko pęknięcia zmęczeniowego (działając jako karb), jak i korozji (odkrycie niezabezpieczonych warstw materiału). Wśród innych usterek znalazły się takie uszkodzenia jak wyboczenia, sfałdowanie, skręcenie, uszkodzenie ważnych uszczelnień oraz ubytki materiału.



Rys. 2. Procentowy udział poszczególnych rodzajów uszkodzeń w całości zidentyfikowanych usterek [8]

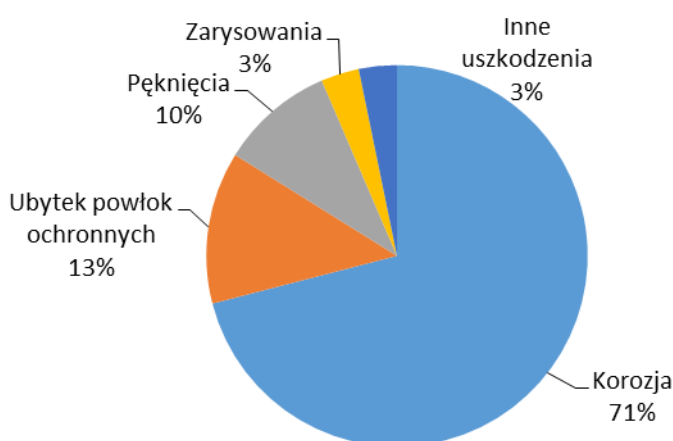
Wykres z rys. 3, ilustrujący jak ilościowo rozkładały się usterek w poszczególnych głównych zespołach i podzespółach płatowca, wyraźnie wskazuje, że prawie połowa wszystkich uszkodzeń została wykryta w kabinie pasażerskiej. Źródłem tego jest specyfika przeprowadzonych przeglądów. Trzy z pięciu przeglądów obejmowały dodatkowe inspekcje struktury kadłuba. Do usterek zaistniałych w kabinie pasażerskiej należą również takie, do których bezpośredni dostęp był możliwy jedynie od strony kabiny, w szczególności struktury płatowca w sekcji centropłatu. Łącznie aż 76% stanowią usterek kadłuba, co wynika z dużej liczby inspekcji tam wykonanych i wielkości tego zespołu płatowca. Częstym zjawiskiem jest znajdowanie bardzo dużej liczby uszkodzeń w lukach bagażowych, które są bardziej podatne na uszkodzenia korozyjne i powstałe na skutek oddziaływania sił skupionych niż kabina pasażerska (uderzenia podczas załadunku i rozładunku samolotu). Obecność w tej strefie piątej części wszystkich usterek można uznać za wynik zadowalający, a przyczyn takie stanu rzeczy doszukać się można w wykonanych tam wcześniej naprawach [9]. Niewielka liczba uszkodzeń zidentyfikowanych na skrzydłach i statecznikach podkreśla bardzo dobre zabezpieczenie tych struktur oraz ich pierwotną odporność na uszkodzenia (wynikającą z doskonałości projektu) [14]. Nie bez znaczenia jest fakt, iż skrzydła oraz ogon podczas użytkowania samolotu mają znikomy kontakt z bezpośrednim oddziaływaniem człowieka, a co za tym idzie z błędami, wynikającymi z szeroko rozumianego czynnika ludzkiego.



Rys. 3. Procentowy rozkład lokalizacji usterek w zespołach płatowca [8]

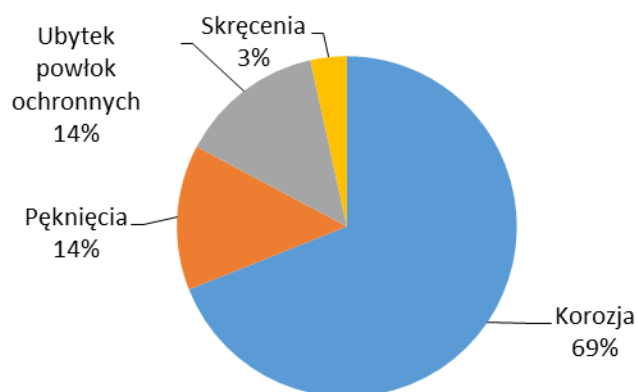
Na kolejnych wykresach zaprezentowano udział różnych rodzajów uszkodzeń w wyszczególnionych zespołach i podzespółach płatowca.

W kabinie pasażerskiej dominują uszkodzenia korozyjne, dotyczące struktury podłogi w tak zwanych strefach mokrych, a więc strefach wokół drzwi, kuchni i toalet (rys. 4). Mimo stosowania zabezpieczeń antykorozyjnych i licznych powłok mających zapobiegać przedostawaniu się wody do elementów metalowych, część z nich uległa zaawansowanej korozji. Woda przedostawała się w miejsca łączeń powłok ochronnych i występowała na ich krawędziach, a więc wokół mocowań modułów toalet i kuchni, od strony listew przyprogowych drzwi oraz przedostawała się przez otwory na śruby mocujące panele podłogowe. Na długości całej kabiny pasażerskiej występowały liczne ubytki powłok zabezpieczających przed korozją, w tym farby. Stwierdzone pęknięcia miały charakter zmęczeniowy (wręgi w centroplacie), a także towarzyszyły uszkodzeniom korozyjnym (strefy mokre) oraz pochodziły od oddziaływań mechanicznych. Zarysowania zdiagnozowano jako skutek niewłaściwego użycia ostrych narzędzi metalowych. Do najpoważniejszych uszkodzeń w tej części płatowca można zaliczyć uszkodzenia tylnej wręgi ciśnieniowej.



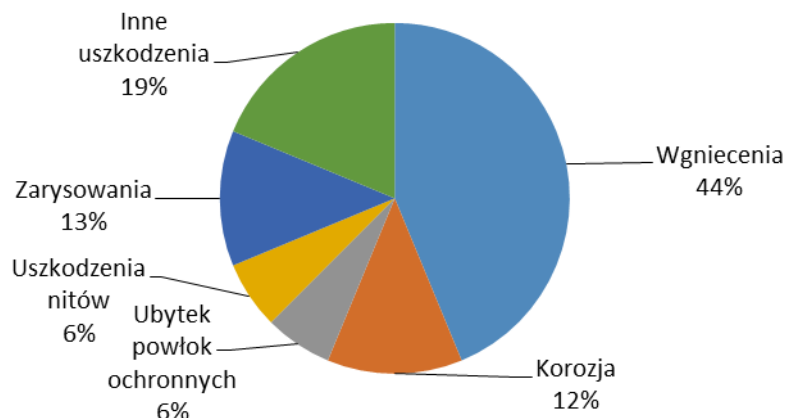
Rys. 4. Procentowy udział poszczególnych rodzajów uszkodzeń wśród usterek zidentyfikowanych w kabinie pasażerskiej [8]

Praktyka obsługowa wskazywałaby luki bagażowe jako strefę o dużej liczbie wykrytych uszkodzeń, zwłaszcza korozyjnych. W przypadku rozpatrywanych samolotów nie zidentyfikowano w tej strefie nadmiernej liczby uszkodzeń. Może mieć to swoje źródło w dobrym utrzymaniu tych obszarów dzięki licznym naprawom [8]. Powszechne były też uszkodzenia korozyjne elementów najbardziej na nie narażonych – belek podłogowych, co wskazuje na nieszczelność podłóg oraz progów drzwi, mimo specjalnej procedury ich uszczelniania. Zaawansowanej korozji towarzyszyły też pęknięcia. Były one efektem zmęczenia materiału, uszkodzenia przez mechaniczne oddziaływanie oraz osłabienia elementu przez wykonanie naprawy (np. zaspawanie pękniętego, tytanowego elementu progu). Skręcenie belki podłogowej, ze względu na lokalizację, niewielki obszar i fakt, że belki podłogowe luków bagażowych nie przenoszą obciążeń z konstrukcji, lecz od ładunków na konstrukcję - to efekt oddziaływania sił zewnętrznych. Najprawdopodobniejsze wydaje się uszkodzenie przez personel obsługowy, np. podczas uwalniania zakleszczonego ładunku lub urządzeń obsługowych (wózków, palet). Rysunek 5 przedstawia procentowy udział poszczególnych rodzajów uszkodzeń wśród usterek wykrytych w lukach bagażowych.



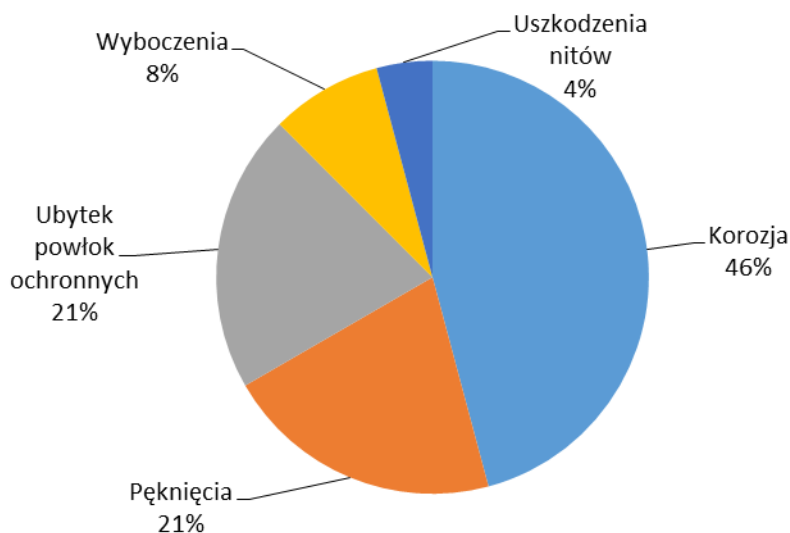
Rys. 5. Procentowy udział poszczególnych rodzajów uszkodzeń wśród usterek zidentyfikowanych w lukach bagażowych [8]

Wśród uszkodzeń poszycia kadłuba od strony zewnętrznej dominują uszkodzenia będące skutkiem oddziaływań mechanicznych obiektów obcych (rys. 6). Źródłem uszkodzeń mogą być: uderzenia kamieni i drobnych obiektów, wyrzucanych spod kół podczas startu i lądowania, uderzenia sprzętu obsługowego do załadunku bagaży, podstawianych schodów i innych, uderzenia ptaków w locie (ang. *bird strike*) i innych, nieprzewidywalnych zdarzeń. Korozja i ubytki powłok stanowią tu mniejszy procent, ponieważ są raczej łatwo zauważalne i szybko eliminowane. Pojawiają się za to inne usterki, jak uszkodzenia nitów i poszycia, wywołane uderzeniami piorunów (tzw. wypalenia). Wśród innych uszkodzeń znajdują się przebiccia, pęknięcia, wyboczenia i sfałdowania.



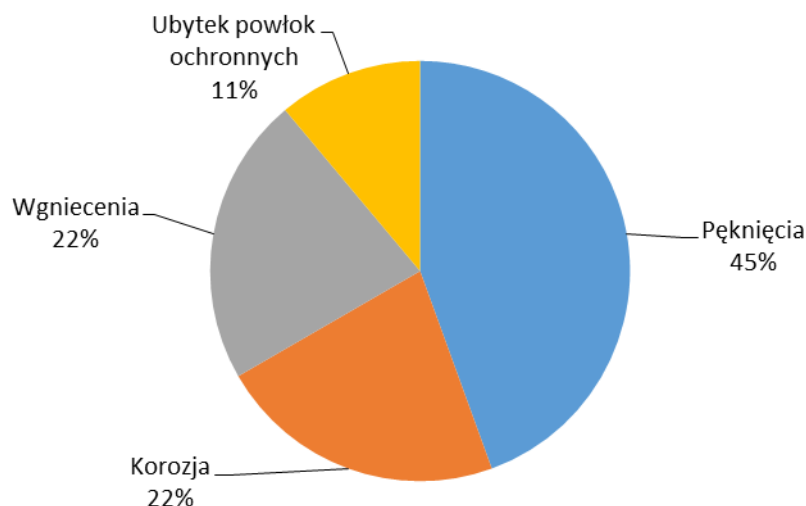
Rys. 6. Procentowy udział poszczególnych rodzajów uszkodzeń wśród usterek wykrytych na pokryciu zewnętrznym kadłuba [8]

Na skrzydłach nie odnotowano dużej liczby uszkodzeń strukturalnych (rys. 7). Wysoki procent uszkodzeń korozyjnych dotyczy głównie centropłatu, gdzie zwiększone jest prawdopodobieństwo kontaktu struktury z wodą i innymi płynami o możliwym działaniu korozyjnym. Zauważyć można niezbyt duży, ale jednak dostrzegalny przyrost uszkodzeń zmęczeniowych w postaci pęknięć. Jest to zupełnie naturalne, gdyż skrzydła podczas lotu cały czas pracują przy zmiennych wartościach obciążeń i kierunkach naprężeń. Zaobserwować można również kilka uszkodzeń związanych z uderzeniami obiektów obcych (głównie ptaków), jednak jest ich zdecydowanie mniej niż w przypadku pokrycia kadłuba. Mimo niewielkiej liczby uszkodzeń wykrytych w tej części płatowca, znajdują się tutaj usterki, mające zasadniczy wpływ na bezpieczeństwo lotów, a więc uszkodzenia dźwigarów skrzydeł i belki kilowej.



Rys. 7. Procentowy udział poszczególnych rodzajów uszkodzeń wśród usterek zidentyfikowanych na skrzydłach i w sekcji centropłatu [8]

W części ogonowej zdiagnozowano najmniej usterek strukturalnych ze wszystkich rozpatrywanych części płatowca (rys. 3). Stateczniki są w mniejszym stopniu narażone na uszkodzenia powodowane przez personel naziemny, a dość dobre zabezpieczenie struktury redukuje liczbę uszkodzeń korozyjnych. Częste są jednak uszkodzenia zmęczeniowe, pochodzące od wzmożonych w tylnej części płatowca drgań. Pojawiają się również uszkodzenia pokrycia kadłuba i dźwigarów stateczników poziomych, pochodzące od tarcia elementów podczas ruchu statecznika poziomego. W tej części płatowca mogą się również pojawić uszkodzenia związane z uderzeniem płozy ogonowej (ang. *tail skid*) o powierzchnię pasa podczas startu lub lądowania. Rysunek 8 ilustruje procentowy udział poszczególnych rodzajów uszkodzeń wśród usterek zidentyfikowanych w części ogonowej ilustruje.



Rys. 8. Procentowy udział poszczególnych rodzajów uszkodzeń wśród usterek zidentyfikowanych w części ogonowej [8]

2.3. Główne przyczyny powstawania zidentyfikowanych uszkodzeń

W powstałym zestawieniu uszkodzeń warto zwrócić uwagę na identyczne i podobne usterki powtarzające się w tych samych strefach na różnych egzemplarzach samolotu. W tabeli 4 zebrano 12 najczęściej powtarzających się uszkodzeń, z zaznaczeniem (symbol X), na których samolotach wystąpiły. Wymienione uszkodzenia w praktyce obsługowej samolotów Boeing 737 występują bardzo często i podczas wykonywania przeglądów typu C można z dużym prawdopodobieństwem przypuścić, iż takie lub podobne usterki zostaną znalezione.

Korozja elementów struktury podłogi w strefach mokrych kabiny pasażerskiej (belki podłogowe od BS259.50 do BS360 oraz od BS927 do BS1016, ich wzmocnienia i inne elementy) jest najczęściej spotykanym uszkodzeniem w tej części płatowca. Odkrycie paneli podłogowych w tych strefach niemal zawsze pozwala na zidentyfikowanie korozji dotyczącej górnej powierzchni wymienionych elementów. Bezpośrednią przyczyną powstawania takich uszkodzeń jest woda, obecna w większej ilości (łazienki, kuchnie, instalacje wodne, wejścia na pokład) w tej części kabiny pasażerskiej. Fakt ten został w sposób oczywisty przewidziany przez konstruktorów, którzy wyposażyli te strefy w specjalną ochronę przed wodą w postaci wielowarstwowych struktur wodoodpornych i uszczelniających. Częste identyfikowanie uszkodzeń korozyjnych w strukturze podłogi stref mokrych wskazuje na możliwość jednoczesnego wystąpienia kilku przyczyn takich usterek:

- zastosowana ochrona przed wodą jest niewystarczająca i/lub,
- wykonanie zabezpieczenia odbyło się w sposób niezgodny z technologią i/lub,
- ponownie zaaplikowano materiały już zużyte i/lub,
- uszkodzono zabezpieczenia i/lub powierzchni elementów metalowych przez niewłaściwe użycie narzędzi (szczególnie ostrych) przez personel obsługowy.

Tab. 4

Zestawienie najczęściej powtarzających się uszkodzeń strukturalnych [8]

Uszkodzenie	Samolot				
	A	B	C	D	E
Korozja belki podłogowej BS312			X	X	X
Korozja listwy przyprogowej przednich i/lub tylnych drzwi wejściowych i/lub serwisowych		X	X	X	X
Ubytki powłok ochronnych elementów struktury kadłuba wewnątrz kabiny pasażerskiej			X	X	X
Korozja wzmocnień między belkami podłogowymi BS947 i BS967		X	X	X	
Korozja belki podłogowej BS967 i/lub BS986.5		X	X	X	X
Korozja wręgi BS990 między podłużnicami S20L i S21L			X	X	X
Pęknięcie wręgi BS601 lub BS616 lub BS639			X	X	X
Ubytek powłok ochronnych i/lub korozja dolnych listew drzwi ewakuacyjnych		X	X	X	
Korozja belek podłogowych w tylnym luku bagażowym	X	X	X	X	X
Korozja lewego i/lub prawego zetownika łączącego ścianki z podłogami w tylnym luku bagażowym		X	X		X
Wgniecenia pokrycia kadłuba wokół drzwi przedniego i/lub tylnego luku bagażowego	X	X	X		X
Korozja listew między podłogami przedniego lub tylnego luku bagażowego		X	X		X

Korozja listew przyprogowych drzwi wejściowych i serwisowych kabiny pasażerskiej również należy do uszkodzeń struktury w strefach mokrych (rys. 9). W tym przypadku woda, która powoduje korozję, pochodzi z opadów atmosferycznych, przedostających się na progi drzwi i do wnętrza kabiny lub jest „wnoszona” przez pasażerów. Woda powinna być odprowadzana przez specjalne drenaże, zamontowane za progami właśnie na listwach przyprogowych (rys. 10). Jednak bardzo często ulegają one zatkaniu przez gromadzenie się w tych miejscach brudu i drobnych obiektów i przestają spełniać swoją funkcję.

W strukturze kadłuba najliczniej występują hermetyczne drenaże sprężynowe, zlokalizowane głównie na linii BLL 0.0 w najniższych punktach pokrycia kadłuba. Ich niedrożność lub uszkodzenie powoduje gromadzenie wody na wewnętrznej stronie pokrycia. Drenaże tego typu wykonane są z tworzywa sztucznego i są bardzo podatne na uszkodzenia podczas ich montażu lub rzadziej demontażu. Podczas pokrywania wewnętrznej struktury kadłuba (od strony luków bagażowych) inhibitorem korozji lub farbą bardzo łatwo o zalanie

i zalepienie takiego drenażu. Często zbyt duży nadmiar zabezpieczenia antykorozyjnego zamiast zostać usuniętym przed zaschnięciem spływa w niższe punkty kadłuba i po zastygnięciu uniemożliwia przedostawanie się wody do drenaży.



Rys. 9. Korozja listwy przyprogowej przednich drzwi serwisowych



Rys. 10. Hermetyczne drenaże sprężynowe dolnej części kadłuba

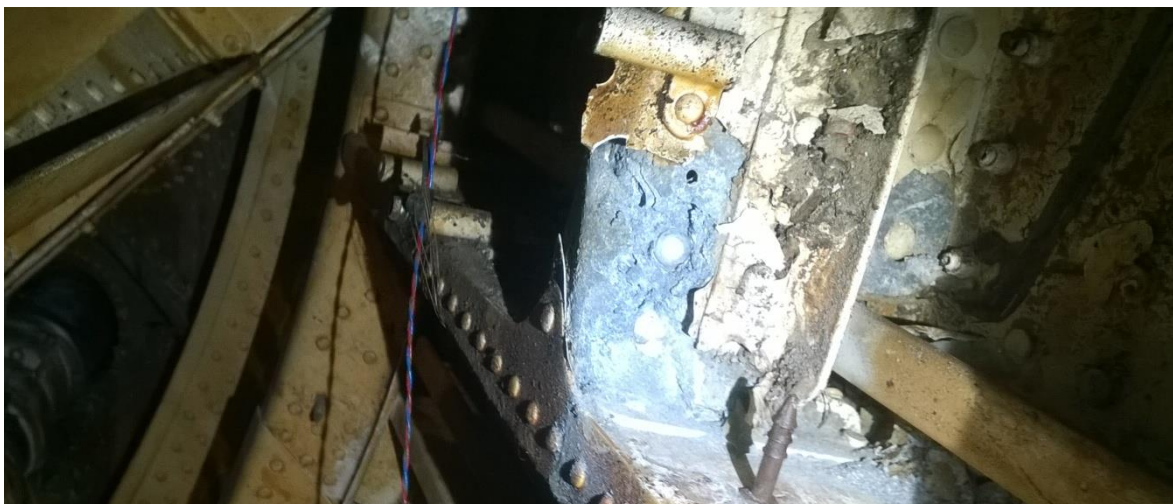
Ubytki powłok zabezpieczających strukturę przed korozją stanowią potencjalne miejsce wystąpienia ogniska korozji, dlatego tak ważne jest identyfikowanie takich uszkodzeń i ich szybka eliminacja. Przyczyn powstawania takich ubytków może być kilka:

- błędne, niezgodne z technologią wykonanie powłok ochronnych,
- odpadanie płatów farby wraz z zewnętrznym zabezpieczeniem antykorozyjnym w wyniku tzw. odparzania powierzchni, spowodowanego długotrwałym kontaktem danego miejsca z wodą lub bardzo częstego kondensowania w tych miejscach pary wodnej („pocenie się” konstrukcji),
- kontakt powierzchni z cieczami rozpuszczającymi powłoki ochronne, w tym farby, np. płyn hydrauliczny, nafta lotnicza.



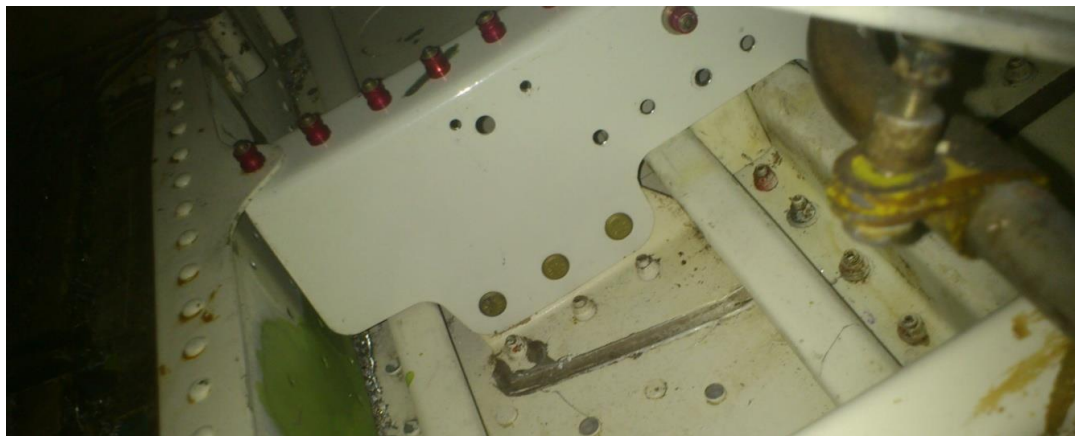
Rys. 11. Ubytek zabezpieczenia antykorozyjnego (w tym farby) oraz korozja wręgi w kabynie pasażerskiej powstałe na skutek zawilgocenia izolacji cieplnej w tym miejscu

Woda pojawiająca się na elementach struktury kadłuba najczęściej gromadzi się w izolacji termicznej, występującej w całej części hermetyzowanej kadłuba (rys. 12). Izolacja taka wykonana jest z higroskopijnej waty szklanej, otulonej nieprzemakalną folią. Jej powłoka zewnętrzna jest bardzo podatna na uszkodzenia mechaniczne, a z czasem staje się krucha i pęka samoistnie przez naprężenia powstałe podczas montażu izolacji. Otwiera to drogę dla wilgoci, a zatrzymana w ten sposób woda nie ma możliwości zostać odprowadzona ani nawet odparować i ma cały czas kontakt z elementami metalowymi struktury. Powoduje to niszczenie powłok zabezpieczających (odparzanie) i korozję tych elementów. Niszczące działanie innych płynów, a przede wszystkim płynów hydraulicznych, spotykane jest przede wszystkim w gondoli podwozia głównego, gdzie znajdują się zbiorniki hydrauliczne i główne elementy instalacji. Jednak wbrew pozorom takie usterki nie są często diagnozowane.



Rys. 12. Korozja występująca na całej grubości materiału i towarzyszące jej pęknięcia oraz łuszczenie wręgi BS 990 między podłużnicami S20L i S21L

Korozja wręgi BS990 między podłużnicami S20L i S21L lub S20R i S21R następuje w miejscu o utrudnionym dostępie, nawet przy zdjętych panelach podłogowych (rys. 13). Zauważenie takiego uszkodzenia jest możliwe właściwie jedynie przy wykonywaniu inspekcji struktury wzmacniającej drzwi. Częste występowanie korozji w tym miejscu wskazuje na duży problem z odprowadzeniem wody z podłużnicy S21 i niewystarczającym działaniu drenaży przyprogowych (lub ich zatkaniu). Długie odstępy czasu między inspekcjami tej struktury stwarzają możliwość powstania w tych miejscach bardzo zaawansowanej korozji, kończącej się całkowitym zniszczeniem elementu. Częstsze kontrolowanie tej strefy mogłoby pozwolić na diagnozowanie i usuwanie korozji w stadium początkowym, bez konieczności wykonywania droższych i czasochłonnych napraw.



Rys. 13. Fragment wręgi BS 990 z rys. 12 w trakcie wykonywania naprawy

Pęknięcia wręg BS601, BS616 i BS639 zlokalizowane nad centralnym płatem skrzydła mają pochodzenie zmęczeniowe. Ich pojawianie się w modelach 737-200, -300, -400, -500 jest na tyle częste, że Boeing opracował kontrolę ich narastania oraz naprawę w formie biuletynu serwisowego z 2005 roku o numerze 737-53A1254. Pracujące w warunkach zmiennych obciążeń (często bardzo dużych) skrzydła przez mocowania przenoszą część sił na strukturę kadłuba. Stąd możliwość występowania pęknięć zmęczeniowych na elementach skupiających obciążenia – wręgach. Warto zaznaczyć, że wręgi najbardziej narażone na pęknięcia, a więc BS601, BS616 i BS639, znajdują się pomiędzy przednim i tylnym mocowaniami skrzydła do kadłuba, a nie na pozycji samych mocowań (rys. 14). Spowodowane jest to skomplikowanym rozkładem naprężeń w elementach struktury, wymuszonym kształtem samej konstrukcji.



Rys. 14. Pęknięcie wręgi BS 616 tuż pod prawą belką odwróconą

Podczas starzenia się statku powietrznego nie można także uniknąć uszkodzeń zmęczeniowych. Żywotność elementów zależy od warunków eksploatacji (w tym zwłaszcza użytkowania – odpowiednio: łagodnego, brutalnego, intensywnego itd.), konstrukcji oraz od ograniczeń materiałów, z których są wykonane.

Poza pęknięciami, innymi spotykanymi uszkodzeniami pochodzenia zmęczeniowego są wyboczenia. Dotykają one elementów struktury wykonanych z arkuszy blachy – pokrycia, ścianek dźwigarów, belek kilowych. Geneza ich powstania polega na chwilowym przekraczaniu granicy plastyczności materiału (zmęczenie niskocyklowe) i stopniowym wydłużeniu fragmentów struktury między stałymi łącznikami (np. nitami). Z powodu powstania nadmiaru materiału (kosztem zmienionej grubości) i jego sztywnego spięcia przez łączniki powstaje wyboczenie.

Rodzajem uszkodzeń, których przyczyną jest oddziaływanie mechaniczne, są wgniecenia pokrycia zewnętrznego płatowca, a przede wszystkim kadłuba. Jak już wspomniano wcześniej, bezpośrednich przyczyn takich uszkodzeń może być wiele, a do najważniejszych należą:

- uderzenia drobnych obiektów wyrzucanych spod kół samolotu podczas startu lub lądowania,
- opad atmosferyczny w formie gradobicia,
- zderzenia samolotu z ptakami w locie,
- uderzenia sprzętu lotniskowego podczas manewrów naziemnych lub postoju.

Szczególnie niebezpieczne może być silne gradobicie lub uderzenie ptaka, ze względu na możliwość uszkodzenia silników lub szyb przednich w kokpicie. Zdarzenia takie powodowały już w przeszłości występowanie incydentów, wypadków, a nawet w skrajnych przypadkach katastrof lotniczych.

Do najczęściej odnotowanych uszkodzeń strukturalnych należy zaliczyć wgniecenia pokrycia kadłuba wokół drzwi luków bagażowych i na samych drzwiach. Są one wynikiem błędów i nieuwagi personelu obsługującego sprzęt lotniskowy i powstają podczas załadunku bagaży, podstawiania pod drzwi wejściowe schodów lub rękawów itp. Najczęściej uszkodzenia w tych rejonach mieszczą się w limitach i nie wymagają napraw. Nie umniejsza to jednak wagi zdarzenia, jakim jest kontakt sprzętu lotniskowego z pokryciem samolotu.

Korozja elementów struktury podłogi luków bagażowych należy do najczęściej identyfikowanych uszkodzeń strukturalnych w samolotach Boeing 737. Przyczyną uszkodzeń jest woda przedostająca się przez uszczelnienie podłóg. Brak lub uszkodzenie uszczelnień powodowane jest oddziaływaniem poruszającego się ładunku oraz przez ewentualne nieprawidłowe wykonanie samego uszczelnienia. Ta druga przyczyna dotyka nie tylko luków bagażowych, ale całego płatowca. Uszczelnienie ma wyeliminować kontakt metalowej struktury z czynnikami powodującymi korozję, przede wszystkim z wodą, ale również innymi płynami, jak płyny hydrauliczne czy nafta lotnicza (uszczelniacz paliwowy).

Tylko poprawnie wykonane uszczelnienie jest w stanie spełnić swoją rolę (rys. 15). Istotne jest tu na wstępie odpowiednie przygotowanie powierzchni przez dokładne oczyszczenie z resztek poprzedniego uszczelnienia i innych zabrudzeń oraz odfuszczenie. Nakładany uszczelniacz powinien zostać rozrobiony zgodnie z instrukcją, nadmiar zebrany, a powierzchnia wygładzona. Czas wysychania uszczelniacza zależy od jego rodzaju, jednak przy najczęściej używanym (P/N: PS870B-1/2) jest to minimum 30 minut. Właściwości uszczelniające uzyskiwane są po ok. 12 godzinach i co bardzo ważne w tym czasie uszczelnienie nie może mieć kontaktu z cieczami. Pełne właściwości mechaniczne uzyskiwane są dopiero po 36 godzinach [17]. Realizacja tego procesu zgodnie z wymogami daje gwarancję skuteczności uszczelnienia.



Rys. 15. Uszkodzenie uszczelnienia między górnymi panelami dostępowymi pylonu samolotu Boeing 737-400 spowodowane niewłaściwym wykonaniem samego uszczelnienia

3. PODSUMOWANIE

Samoloty w wersji Boeing 737-400, jako obiekty badań przedstawione w artykule, w ciągu najbliższych kilkunastu lat przestaną być wykorzystywane jako samoloty pasażerskie. Jednak okres ten będzie wymagał intensywnych działań w celu zapewnienia ich niezawodnej eksploatacji. Wysoka popularność wąskokadłubowych samolotów małego i średniego zasięgu będzie powodować dalszą, zaawansowaną eksploatację samolotów zbliżonych konstrukcyjnie do Boeinga 737-400, a więc nowszych wersji modelu 737 (przede wszystkim 737-800 i oczekiwanego 737 MAX), samolotów z rodziny Airbus A320. Dotyczy to również innych mniejszych samolotów pasażerskich o metalowej, półskorupowej konstrukcji, jak Embraer 170 i 190 czy Bombardier CRJ900. Takie prognozowanie przyszłości pozwala przypuszczać, iż przedstawiona analiza występowania usterek w omawianym samolocie i dane wynikające z analizy usterek strukturalnych pozostaną zgodne z rzeczywistością obsługową jeszcze przez długi czas.

Wnioski ogólne przydatne w dalszej eksploatacji tej rodziny samolotów, wynikające z analizy sprowadzić można do następujących zagadnień:

1. Rodzaj i zakres przeglądu niemal całkowicie określa możliwość wykrycia uszkodzenia – wykonywane są jedynie inspekcje przewidziane przez dany rodzaj i zakres przeglądu, a więc część uszkodzeń może zostać niewykryta. Jest to zgodne z filozofią projektowania konstrukcji *fail safe*.
2. Proces starzenia się statku powietrznego jest głównym czynnikiem kształtującym powstawanie uszkodzeń strukturalnych – identyfikuje się najwięcej usterek, do których powstania wymagany jest pewien czas. Należą do nich uszkodzenia korozyjne i pęknięcia zmęczeniowe. W przypadku konstrukcji 20-letnich wykrywa się również poważne uszkodzenia kluczowych elementów płatowca, takich jak belka kilowa czy tylna wręga ciśnieniowa.
3. Duża część uszkodzeń strukturalnych ma genezę w błędach ludzkich – większość przedstawionych wcześniej przyczyn powstawania uszkodzeń strukturalnych jest pośrednio lub bezpośrednio powodowana przez działanie człowieka. Zazwyczaj są to działania niecelowe – błędy związane z czynnikiem ludzkim, a w celu ich uniknięcia należy zwiększyć proces nadzoru nad wykonywanymi czynnościami.
4. Zapobieganie powstawaniu uszkodzeń strukturalnych powinno ponadto opierać się na uświadomieniu personelu obsługowego o istotności poprawnego i dokładnego wyko-

nywania podstawowych czynności obsługowych w kształtowaniu odporności konstrukcji na uszkodzenia. Jak się po raz kolejny okazuje najslabszym ogniwem danego systemu obsługowego jest zawsze człowiek z powodu presji czasu, niewiedzy, niedoskonałości, a w skrajnym przypadku nieodpowiedzialności i brawury. Wśród młodych mechaników należy zakorzenić działanie ściśle zgodnie z instrukcją przewidzianą przez producenta oraz uświadomić, jakie znaczenie dla konstrukcji mają podstawowe, nawet proste czynności obsługowe.

5. Zmniejszenie okresów między kolejnymi inspekcjami elementów szczególnie narażonych na uszkodzenia korozyjne i pęknięcia zmęczeniowe pozwoliłoby w znacznym stopniu ograniczyć powstawanie oraz dalszy rozwój takich uszkodzeń. Pozwoiłoby to skrócić czasy i koszty realizacji kolejnych czynności obsługowych.

References

1. Dobrzański Leszek. 1998. *Metaloznawstwo z podstawami nauki o materiałach*. [In Polish: *Metallurgy basics of material science*]. Warszawa: WNT.
2. Godzimirski Jan. 1999. *Lotnicze materiały konstrukcyjne*. [In Polish: *Aviation structural materials*]. Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna. ISBN: 978-83-61486-01-5.
3. Golda P. 2015. „Główne przyczyny powstawania uszkodzeń strukturalnych identyfikowanych podczas przeglądów typu C samolotu Boeing 737-400”. Praca Dyplomowa Magisterska. Katedra Technologii Lotniczych, Wydział Transportu, Politechniki Śląskiej, Katowice, Polska. Promotor: Konieczka Robert. [In Polish: “The main causes of structural damage identified during the review of C-type Boeing 737-400”. MSc thesis. Department of Aviation Technology, Faculty of Transport, Silesian University of Technology, Katowice, Poland. Supervisor: Konieczka Robert].
4. Kaczorowski Mieczysław, Anna Krzyńska. 2008. *Konstrukcyjne materiały metalowe, ceramiczne i kompozytowe*. [In Polish: *The structural materials of metal, ceramic and composite*]. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN: 978-83-7207-761-5.
5. Lopes Júlio. 2008. Material selection for aeronautical structural application. *Ciência & Tecnologia dos Materiais* 20(3/4): 78-82.
6. The Boeing Company. 2014. *737-300, -400, -500 Aircraft Maintenance Manual*. Boeing Document D6-37535, Revision No. 80, 25.09.2014.
7. The Boeing Company. 2012. *737-400 Structural Repair Manual*. Boeing Document D6-38246, Revision No. 79, 10.03.2012.
8. *Niepublikowane dane udostępnione przez Organizację Obsługową posiadającą certyfikat EASA Part 145*. [Unpublished data provided by a maintenance organization holds EASA Part 145].
9. Wikipedia. “Boeing 737”. Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_737.
10. AIRFLEETS.NET. Available at: <http://www.airfleets.net>.
11. AIRLINERS.NET. “Boeing 737-400”. Available at: <http://www.airliners.net/aircraft-data/stats.main?id=93>.
12. AK Steel. “Product data sheet 15-5PH Stainless Steel”. Available at: http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/stainless/precipitation/15-5_ph_data_sheet.pdf.
13. The 737 Technical Site. “The Boeing 737 Technical Site”. Available at: <http://www.b737.org.uk>.
14. BOEING. Available at: <http://www.boeing.com>.

15. ET UK Ltd. Available at:
<http://www.etltd.co.uk/titanium%20aerospace%20sheet%20plate.html#AS02>.
16. Flightglobal. "THE 737 STORY: Little wonder". Available at:
<https://www.flightglobal.com/news/articles/the-737-story-little-wonder-204505>.

Received 11.09.2015; accepted in revised form 21.11.2015



Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License