

FIZYCZNE ASPEKTY NIESPRAWNOŚCI I USZKODZEŃ STATKÓW POWIETRZNYCH

Podstawą wiedzy o eksploatacji statków powietrznych powinna być gruntowna znajomość fizyki powstawania niesprawności i uszkodzeń. Znając bowiem uwarunkowania fizyczne zjawisk, można budować modele niezawodnościowe i decyzyjne, które pozwolą oprzeć eksploatację na zasadach tak zwanej podatności degradacyjnej, czyli odporności na degradację. Budowanie modeli niezawodnościowych i decyzyjnych, uwzględniających fizykę powstawania uszkodzeń, nie jest zadaniem prostym. Wnikanie w naturę zjawisk fizycznych i chemicznych będących przyczyną uszkodzeń podyktowane jest także koniecznością opracowywania metod – przyspieszonych, skróconych i uproszczonych – badania trwałości elementów i zespołów statków powietrznych (SP) oraz wykrycia rzeczywistych przyczyn wypadków lotniczych, jeśli zostały spowodowane przyczynami technicznymi lub eksploatacyjnymi.

NIESPRAWNOŚCI I USZKODZENIA STATKÓW POWIETRZNYCH

Pojęcia podstawowe

Istotą działania lotnictwa jest wykonanie zadania lotniczego (ZL). Techniczną przesłanką niewykonania ZL, przerwania jego wykonywania albo nawet nierozpoczęcia wykonywania (mimo iż zostało ono zaplanowane) może być ujawniona niesprawność. Niesprawność może dotyczyć zespołu lub

całego statku powietrznego i może być rozpatrywana ze względu na różne kryteria: skutków, czasu, sposobu usunięcia, przyczyn, rodzaju, miejsca i czasu powstania itp. (tabela 1).

Do podstawowych przyczyn niesprawności zalicza się: uszkodzenie, zacięcie, rozregulowanie, niezadziałanie, zakłócenie działania, brak zasilania (elektrycznych, paliwowych, olejowych, smarnych, gazowych), **deficyt zdolności potencjalnej** (element jest zdolny, ale wykonanie postawionego zadania przekracza zakres cech), **wadliwe działanie** (wykonywanie określonej operacji w sposób niezgodny z wymaganiami) itp. Za pierwotną przyczynę niesprawności uznaje się uszkodzenie elementu lub równoczesne uszkodzenie kilku elementów zespołu, urządzenia, agregatu (ogólnie struktury technicznej).

Niesprawność to utrata funkcjonalnej (użytkowej) właściwości struktury technicznej.

Usunięcie niesprawności SP (zespołu, elementu) to przywrócenie jego właściwości funkcjonalnej, spełniającej określone (nałożone) warunki techniczne – poprzez usunięcie uszkodzenia, wyregulowanie elementów w SP – poprzedzone zdiagnozowaniem stanu technicznego i prognozą dalszego niezawodnego funkcjonowania.

Wśród przyczyn powstawania niesprawności podstawową rolę odgrywają uszkodzenia.

Uszkodzenie to:

Tabela 1

Podział niesprawności statku powietrznego według różnych kryteriów

Nazwa kryterium	Opis (rodzaj, typ)
Przyczyna niesprawności główna	– uszkodzenie – zacięcie – niezadziałanie – wadliwe wskazanie – wyłączenie – zakłócenie działania – deficyt zdolności potencjalnej – wadliwe działanie
Przyczyna niesprawności pośrednia	– konstrukcyjna – technologiczna – eksploatacyjna • obsługowa • alimentacyjna • remontowa • normalnego zużycia itp.
Rodzaj niesprawności	– pierwotna – wtórna
Sposób usunięcia	– wymiana – naprawa doraźna – remont – regulacja
Moment wystąpienia niesprawności w procesie eksploatacji	– w czasie lotu – w czasie utrzymywania zdolności – w czasie transportu – w czasie odnowy (naprawy, remontu)
Typ niesprawności	– stopniowa – nagła od czynników zewnętrznych – nagła od czynników wewnętrznych
Skutek wystąpienia niesprawności	– poważny (np. wypadek lotniczy) – bez dużych następstw (operacyjnych, ekonomicznych itp.) – bez następstw (praktycznie)

- **utrata fizycznych własności i (lub) właściwości elementu konstrukcyjnego;**
- **zdarzenie polegające na przejściu struktury technicznej (ST) (elementu) ze stanu zdolności do stanu niezdatności.**

Podstawowym kryterium zaliczenia danego zdarzenia do zdarzeń zwanych uszkodzeniami jest zmiana (odstępstwo) cechy lub zespołu cech, na podstawie których ustala się zdolność (niezdolność) ST lub elementu. W tabeli 2 wyszczególniono rodzaje i typy uszkodzeń, wzięwszy pod uwagę różne kryteria podziału, a w tabeli 3 – przykładowe rodzaje uszkodzeń (PN-80/N-04000).

Często używa się pojęcia **usterka**. Przez to pojęcie można rozumieć drobne uszkodzenia, zacięcia itp., które nie wywołują znaczących następstw operacyjnych, ekonomicznych i których likwidowanie nie jest

pracochłonne. Najczęściej typy i rodzaje usterek wyspecyfikowane są w dokumentacji techniczno-eksploatacyjnej statku powietrznego.

Niesprawność, uszkodzenie, usterka pociągają za sobą zmianę możliwości działania (lotu) SP, powstanie sytuacji jego niezadziałania (braku możliwości wykonania ZL lub przerwania jego wykonywania).

Działanie SP – to wykonywanie – aktualnie – przez SP określonej operacji niezależnie od tego, czy operacja ta jest zgodna czy niezgodna z wymaganiami.

Niezadziałanie SP – to zdarzenie polegające na nierozpoczęciu przez SP przewidzianej pracy lub jej przerwanie w wyniku powstałej niesprawności.

Niezadziałanie to każde uszkodzenie, które powoduje:

Tabela 2

Podział uszkodzeń struktur technicznych lub elementów według różnych kryteriów

Nazwa kryterium	Opis (rodzaj, typ)
Przyczyna uszkodzenia	– konstrukcyjna – technologiczna • wada technologiczna • wada materiałowa – eksploatacyjna • obsługowa • remontowa • magazynowa • normalnego zużycia – warunki zewnętrzne
Rodzaj uszkodzenia	– pierwotne – wtórne
Sposób uszkodzenia	– nagły – stopniowy – chwilowy
Przyczyna uszkodzenia elementu	– zmiana wymiarów geometrycznych – zmiana własności materiału – zmiana własności elektrycznych

a) niewykonanie zaplanowanego lotu lub opóźnienie lotu,

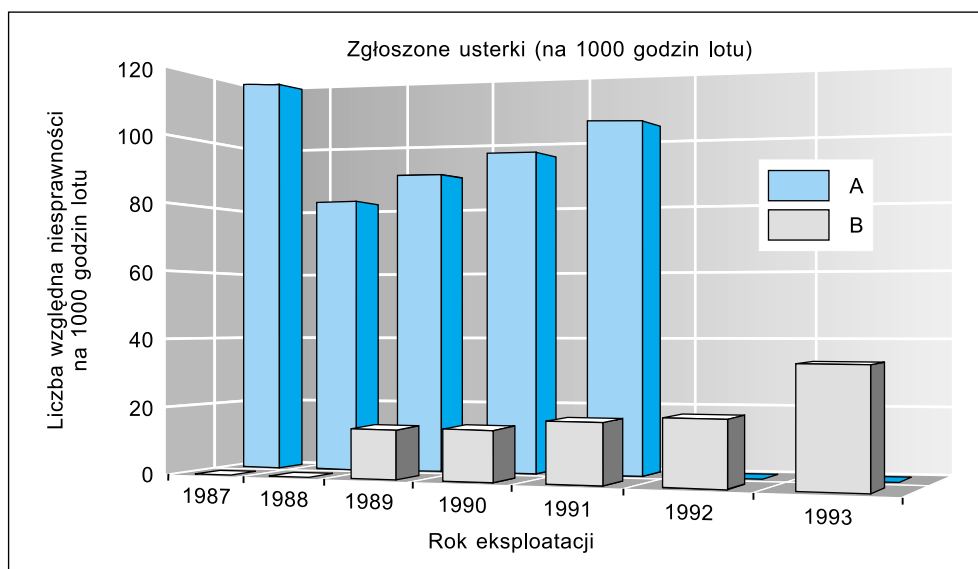
b) zaniechanie lub skrócenie lotu po starcie,

c) konieczność posłużenia się systemem zapasowym lub konieczność postępowania awaryjnego,

d) wypadek.

Eksplatacja SP służy określonym celom. Z punktu widzenia takich właściwości, jak niezawodność, gotowość i bezpieczeństwo lotów najważniejszą właściwością SP jest jego bezawaryjność.

Bezawaryjność SP to właściwość SP charakteryzująca jego utrzymywanie się w stanie zdatności.



Rys. 1. Intensywność uszkodzeń samolotów Ił-62 (A) i B-767 (B) mierzona liczbą względną niesprawności na 1000 godzin lotu (dane PLL LOT)

Tabela 3

Opis wybranych uszkodzeń

Nazwa niesprawności	Opis
Uszkodzenie wynikające z błędów konstrukcyjnych	Uszkodzenie powstałe wskutek błędów projektowania
Uszkodzenie wynikające z błędów produkcyjnych	Uszkodzenie powstałe wskutek błędów i niedokładności procesów technologicznych lub wad materiałowych
Uszkodzenie wynikające z błędów eksploatacyjnych	Uszkodzenie powstałe wskutek nieprawidłowej eksploatacji
Uszkodzenie pierwotne	Uszkodzenie elementu systemu, które ani bezpośrednio, ani pośrednio nie zostało spowodowane uszkodzeniem innych elementów systemu
Uszkodzenie wtórne	Uszkodzenie elementu systemu, które bezpośrednio lub pośrednio zostało spowodowane uszkodzeniem innych elementów systemu
Uszkodzenie nagłe	Uszkodzenie występujące nagle i nie dające się przewidzieć na podstawie przeglądu lub obsługi profilaktycznej
Uszkodzenie stopniowe	Uszkodzenie dające się przewidzieć na podstawie wyników przeglądu lub obsługi profilaktycznej
Uszkodzenia tego samego rodzaju	Uszkodzenia, które z fizycznego punktu widzenia charakteryzują się tym samym zespołem cech lub tym samym zespołem przyczyn powodujących te uszkodzenia
Uszkodzenie katastroficzne	Uszkodzenie, które spowodowało straty znacznie przekraczające przeciętną wartość strat związanych z uszkodzeniem
Uszkodzenie nieodwracalne	Przejście obiektu ze stanu zdatności do stanu niezdatności, po którym niemożliwe jest naprawienie tego obiektu w określonych warunkach
Uszkodzenie nieprzewidywane	Uszkodzenie, którego wystąpienia w trakcie użytkowania nie brano pod uwagę podczas projektowania obiektu
Uszkodzenie obiektu wskutek procesu zużycia	Uszkodzenie powstałe w wyniku procesu systematycznych zmian właściwości fizycznych tego obiektu
Uszkodzenie odwracalne	Przejście obiektu ze stanu niezdatności, po którym możliwe jest doprowadzenie tego obiektu do stanu zdatności
Uszkodzenie przewidywane	Naturalne uszkodzenie, którego wystąpienie w trakcie użytkowania brano pod uwagę podczas projektowania obiektu. W okresie starzenia wstępnego jest to przeważnie uszkodzenie pierwotne
Uszkodzenie wtórne	Uszkodzenie, którego istotną przyczyną jest co najmniej jedno z powstałych wcześniej uszkodzeń tego obiektu
Uszkodzenie nagłe	Uszkodzenie, które występuje skokowo

Ilościowo bezawaryjność SP ocenia się wieloma różnymi wskaźnikami niezawodności, np.: oczekiwany czasem utrzymania się w stanie zdatności w określonym przedziale czasu (np. podczas lotu), intensywnością prac obsługowych lub odnów, intensywnością uszkodzeń. Na rys. 1 i rys. 2 zobrazowano wyniki eksploatacyjne oraz pracochłonność obsług dwóch typów statków powietrznych *Il-62* i *B-767*, eksploatowanych w PLL LOT w latach 1987 - 1993. Widoczne są wyraźne różnice wartości zobrazowanych parametrów, co wynika z faktu, iż rozpatrywano statki powietrzne dwóch różnych generacji – *Il-62* z lat 1950 - 1960 i współczesny *B-767*.

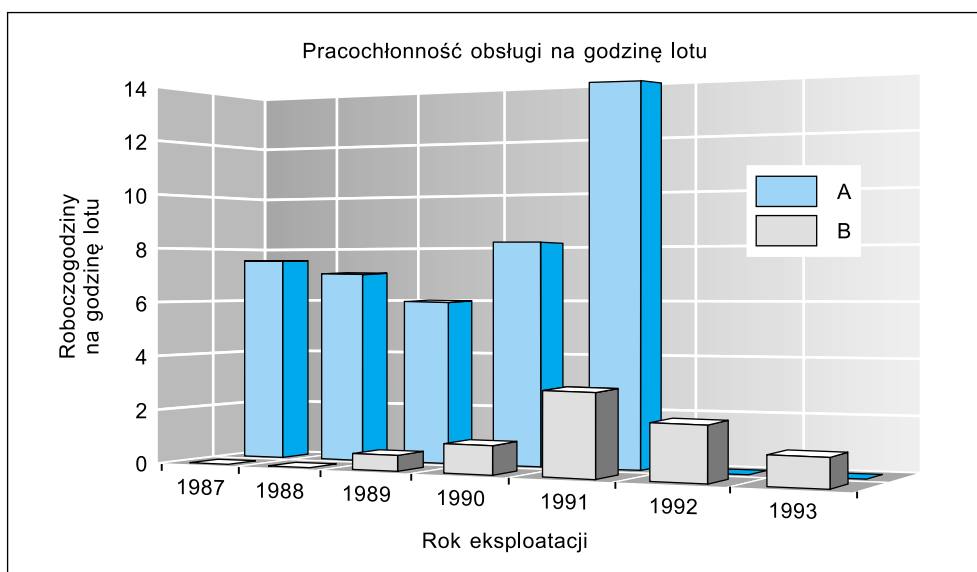
Pojęciem węższym od pojęcia bezawaryjności jest pojęcie nieuszkodzalności SP. W

przypadku zaistnienia konieczności odnowy (wykonania określonego typu naprawy, np. poszycia struktury płatowca) należy posłużyć się pojęciem „naprawialność SP”.

Neuszkodzalność SP – właściwość charakteryzująca jego zdolność do ciągłego zachowania stanu zdatności podczas wykonywania zadania (ZL).

Naprawialność (odnawialność) SP – właściwość charakteryzująca jego zastosowanie do wykonywania napraw (odnów) w określonych warunkach eksploatacji, z wykorzystaniem odpowiednich metod, procedur i narzędzi (MPN).

Z punktu widzenia eksploatacji SP można mówić o typowych niesprawnościach i uszkodzeniach, a więc takich, które są już dostatecznie dobrze zidentyfikowane, opi-



Rys. 2. Pracochłonność usuwania niesprawności samolotów Il-62 (A) i B-767 (B) w roboczogodzinach na godzinę lotu (dane PLL LOT)

sane w dokumentacji eksploatacji SP, jak również o nowych postaciach (rodzajach) niesprawności i uszkodzeń, tworzących nowy zbiór, a pojawiających się podczas bieżącej eksploatacji SP. Te nowe postacie niesprawności i uszkodzeń mogą mieć charakter jednostkowy lub systemowy. W działalności eksploatacyjnej reaguje się na nie odpowiednimi działaniami profilaktycznymi.

W różnych systemach eksploatacyjnych statki powietrzne charakteryzują się różną częstością ich użytkowania. Na przykład w cywilnych systemach transportowych czas użytkowania SP może stanowić 50 - 80% czasu dobowego. W innych systemach, np. wojskowych, statek powietrzny większość czasu znajduje się w stanie przechowywania lub w stanie oczekiwania na realizację ZL. W tych stanach na powstawanie niesprawności i uszkodzeń duży wpływ mają czynniki zewnętrzne (oddziaływanie atmosfery), rozwijające się procesy starzeniowe, korozyjne, naprężeniowe (termiczne) itp.

Jedną z istotnych przyczyn powstawania niesprawności i uszkodzeń są wady elemen-

tów wchodzących w skład struktur technicznych.

Wada obiektu to wada wynikająca z niespełnienia wymagań przez co najmniej jedną z cech obiektu. Wada obiektu nie jest równoznaczna ze stanem niezdatności, ale jej istnienie powoduje zazwyczaj zwiększenie prawdopodobieństwa powstania uszkodzenia. Wady obiektu mogą powstać zarówno w trakcie jego projektowania (wada konstrukcyjna), jak i w procesie wytwarzania lub podczas eksploatacji obiektu.

Wada konstrukcyjna obiektu to wada obiektu powstała na skutek błędu konstrukcyjnego popełnionego w trakcie projektowania tego obiektu.

Wada materiałowa obiektu to wada powstała wskutek użycia podczas wytwarzania obiektu surowca (materiału) niezgodnego z wymaganiami.

Wada produkcyjna obiektu to wada powstała na skutek błędu produkcyjnego (błędu w procesie obróbki) w trakcie wytwarzania tego obiektu.

Pojęcie uszkodzenia statków powietrznych (SP) obejmuje zarówno uszkodzenia struktury, podstawowych zespołów SP, jak

również uszkodzenia poszczególnych elementów (części) składowych zespołów SP. Uszkodzenia elementów pociągają za sobą często uszkodzenia zespołów, w których skład wchodzi bądź (lub i) uszkodzenia innych zespołów SP. Zdarza się, że uszkodzenie statku powietrznego, jako całości, powoduje uszkodzenie, a nawet zniszczenie, podstawowych elementów konstrukcyjnych (utrudniając ustalenie przyczyny wypadku lotniczego).

Uszkodzenia są skutkiem bądź świadomego przekroczenia dopuszczalnych obciążeń (np. przez załogę, operatora czy personel obsługujący SP), bądź oddziaływań i zaburzeń zewnętrznych, bądź też normalnych zjawisk fizycznych i chemicznych, będących immanentną właściwością realizowania zadań (pracy), lub czasu. Zalicza się tu na przykład zużycie węzłów tribologicznych, korozję czy starzenie materiałów.

Problem uszkodzeń elementów SP występuje w całym okresie eksploatacji SP, choć w różnych okresach dominują różne przyczyny.

W pierwszym okresie eksploatacji, okresie tzw. docierania, głównymi przyczynami są odchyłki technologiczno-montażowe od założonych norm oraz wady materiałowe. Wraz z upływem czasu eksploatacji znaczenia nabierają przyczyny tribologiczne, zmęczeniowe i korozyjne.

Przez cały okres eksploatacji SP degradacji ulegają jego elementy konstrukcyjne. Warunki pracy (wytężenia materiału, odkształcenia, zużycia itp.) do końca nieprzewidywalne – ekstremalne, warunki oddziaływań zewnętrznych o losowym charakterze zmienności, wpływają w decydujący sposób na obniżenie wytrzymałości własnej struktury SP i jego elementów w zespołach i podzespółach wykonawczych. Problemy te próbuje rozwiązywać teoria degradacji. Obecnie teoria ta dopiero zaczyna się rozwijać.

O ile w wielu przypadkach uszkodzenia niektórych elementów i zespołów umożliwiają jeszcze dokończenie lotu statku po-

wietrznego, o tyle nieuniknione – takie są prawa przyrody – uszkodzenia struktury statku powietrznego, a w szczególności jego kadłuba i usterzenia, zwiększają ryzyko zniszczenia statku, a to oznacza możliwość zaistnienia katastrofy lotniczej. Właśnie dlatego spośród różnych zagadnień eksploatacyjnych, badanie przyczyn uszkodzeń nabiera tak dużego znaczenia.

Uszkodzenia SP, szczególnie w locie, w znaczący sposób wpływają na bezpieczeństwo, ale także na wszystkie wskaźniki gotowości technicznej SP charakteryzujące gotowość do wykonania zadań. Uszkodzenia, wywołane różnymi przyczynami, dzielą się na: a) przewidywalne – rozwijające się w miejscach łatwo dostępnych i diagnozowanych (różnymi metodami, z bogatego już arsenału technik diagnostycznych). Przykładem takiego uszkodzenia jest pęknięcie klapy skrzydła na pokryciu zewnętrznym czy zużywanie łożyska w instalacji olejowej o cyklu zamkniętym (badanie produktów zużycia); b) nieprzewidywalne – jako przykład można wskazać katastrofę samolotu B-747 spowodowaną pęknięciem zmęczeniowym tylnej przegrody ciśnieniowej (rys. 16). Uszkodzenia nieprzewidywalne powstają nagle (uszkodzenia układów elektronicznych) albo mogą objawiać się nagle po dłuższej lub krócej rozwijającym się procesie destrukcji elementu, najczęściej w miejscu ukrytym i nie zauważonym przez personel obsługujący.

Przed skutkami uszkodzeń zabezpieczamy się bądź przez zwielokrotnianie zespołów, obwodów instalacji, bądź przez odpowiednie przewymiarowanie elementów struktury konstrukcyjnej SP zwane nadmiarowością.

Jak widać, ważną rolę odgrywa projektowanie struktur SP bezpiecznych i ekonomicznych. Dla utrzymania wysokich wskaźników niezawodnościowych, bezpieczeństwa i gotowości zasadnicze znaczenie ma – po wprowadzeniu SP do eksploatacji – diagnostyka. Odpowiednio wkomponowana w ogólny system eksploatacji SP (ulegają-

cy w czasie doskonaleniu) umożliwia wykrycie niesprawności i uszkodzeń.

Na rys. 3 zestawiono udziały procentowe uszkodzeń wojskowych statków powietrznych w zbiorze uszkodzeń zaistniałych w ciągu jednego roku eksploatacji tych statków i zarejestrowanych przez poszczególne specjalności. Istniejące systemy zbierania informacji o niesprawnościach i uszkodzeniach SP umożliwiają wykrywanie istotnych zagrożeń funkcjonowania systemów lotniczych, wskazują bowiem na możliwe uszkodzenia, tym samym więc pozwalają na podejmowanie odpowiednich decyzji co do likwidacji tych zagrożeń.

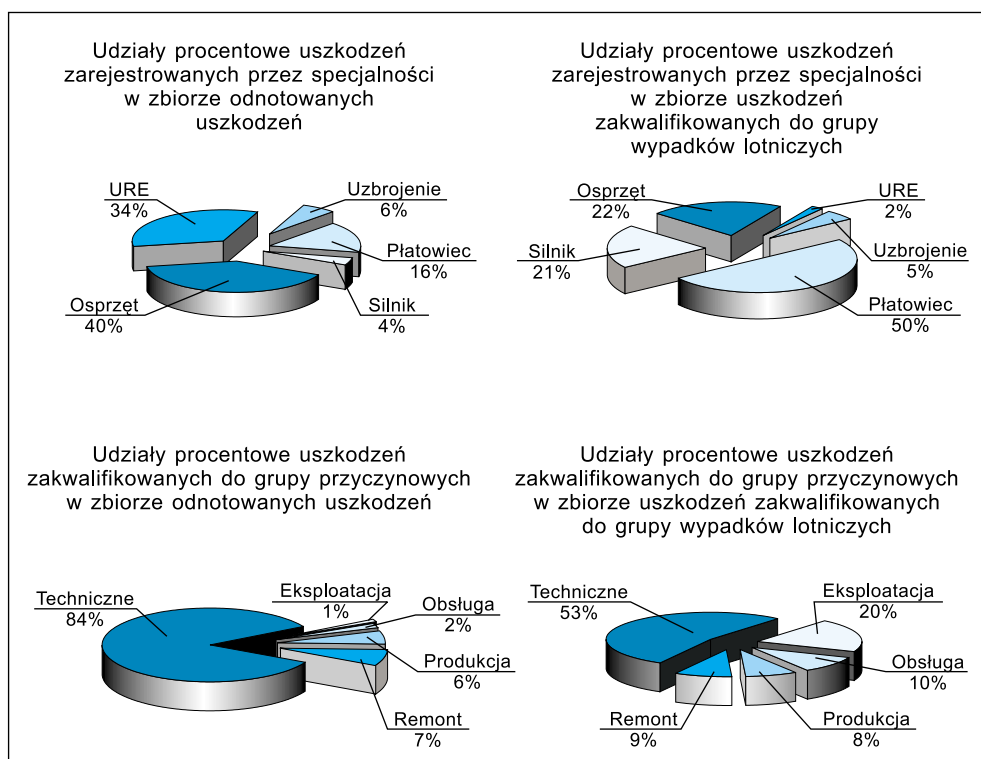
Do podstawowych obszarów analizy techniki lotniczej można zaliczyć udział procentowy uszkodzeń:

- zarejestrowanych przez specjalności w zbiorze odnotowanych uszkodzeń, z uwzględnieniem podziału na płatowiec,

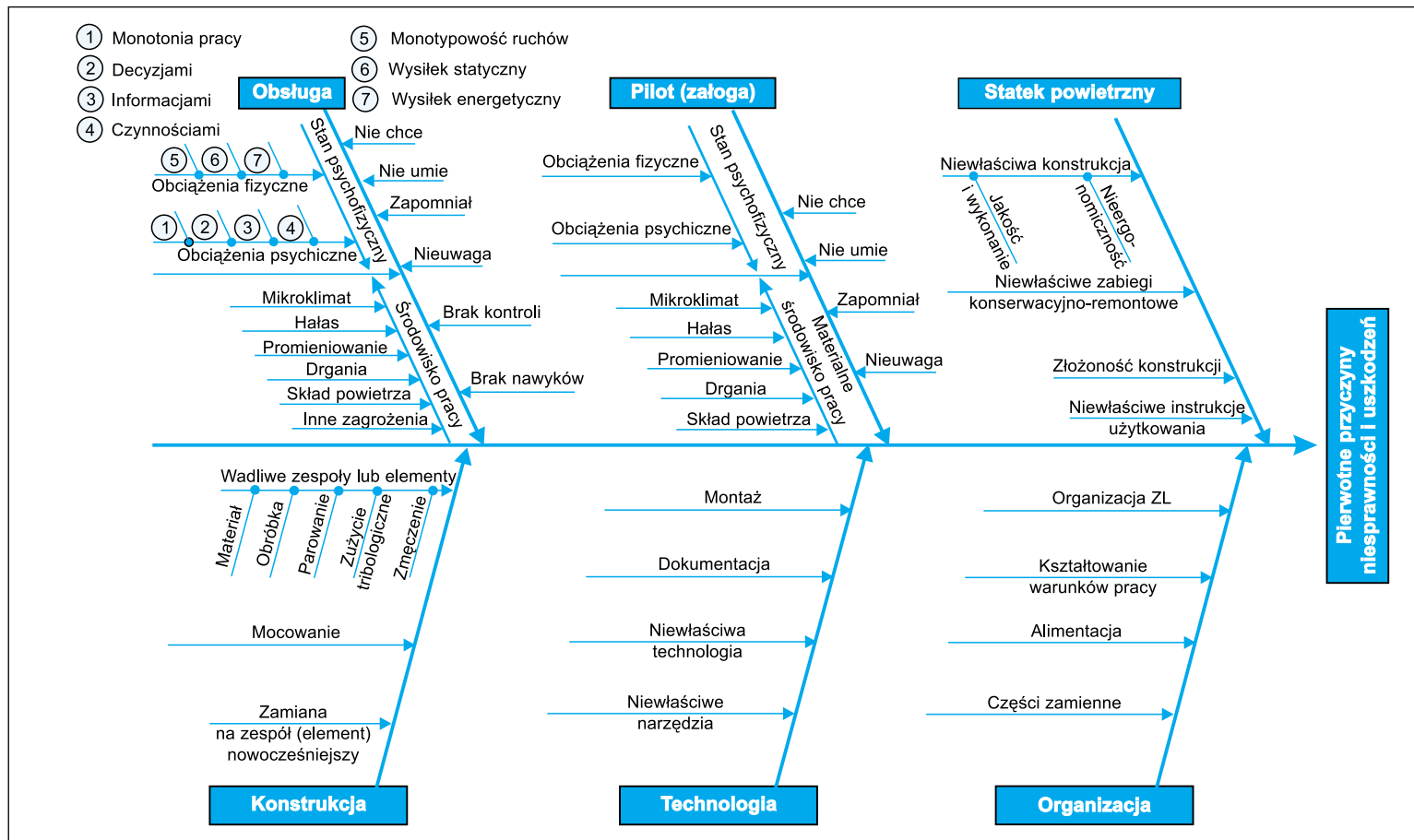
silnik, osprzęt, uzbrojenie, urządzenia radioelektroniczne (URE);

- zarejestrowanych przez specjalności w zbiorze uszkodzeń zakwalifikowanych do grupy wypadków lotniczych, z uwzględnieniem podziału na: płatowiec, silnik, uzbrojenie, osprzęt, URE;
- zakwalifikowanych do grupy przyczynowych w zbiorze odnotowanych uszkodzeń, z uwzględnieniem podziału na: techniczne, eksploatacyjne – użytkowanie w powietrzu, eksploatacyjne – obsługa na ziemi, produkcyjne, remontowe;
- zakwalifikowanych do grup przyczynowych w zbiorze uszkodzeń zakwalifikowanych do grupy wypadków lotniczych: techniczne, eksploatacyjne – użytkowanie w powietrzu, eksploatacyjne – obsługa na ziemi, produkcyjne, remontowe.

Każde z przytoczonych zestawień pozwala na dalszą, bardziej wnikliwą analizę nie-



Rys. 3. Udziały procentowe uszkodzeń w podziale na specjalności lotnicze i przyczyny wypadków lotniczych (lotnictwo wojskowe PSP w skali jednego roku)



Rys. 4. Pierwotne przyczyny powstawania niesprawności i uszkodzeń

sprawności i uszkodzeń. Przykładów przyczyn niesprawności i uszkodzeń można dozukiwać się, rozpatrując algorytmy ich pierwotnych przyczyn (rys. 4).

Modele niesprawności i uszkodzeń

Model powstania niesprawności i wpływu uszkodzenia (jako reprezentanta przyczyn niesprawności) przedstawiony jest na rys. 5. Wśród podstawowych stanów, w jakich może znaleźć się statek powietrzny, w jakim nastąpiła niesprawność w wyniku uszkodzenia, można wyróżnić stan:

- zdatności;
- częściowej zdatności;
- niezdatności.

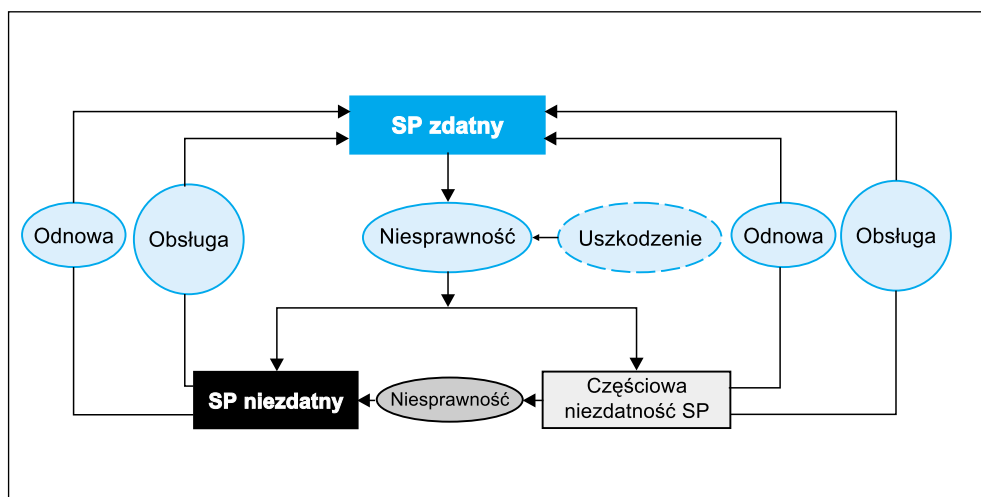
Takie czynności, jak wykonanie prac utrzymania zdatności i odnowa (remont, wymiana, naprawa) przywracają stan zdatności SP lub częściowej zdatności.

Stan niezawodnościowy elementu (zespołu, całego SP) charakteryzuje zbiór (wektor, macierz) cech C . Zmiana chociażby jednej cechy C poza przedział wartości dopuszczalnej dolnej C_i^d lub górnej C_i^g przenosi stan elementu ze stanu zdatności do stanu niezdatności. To przejście może być stopniowe lub nagle skokowe. **Przejście to w funkcji parametru procesu użytkowania elemen-**

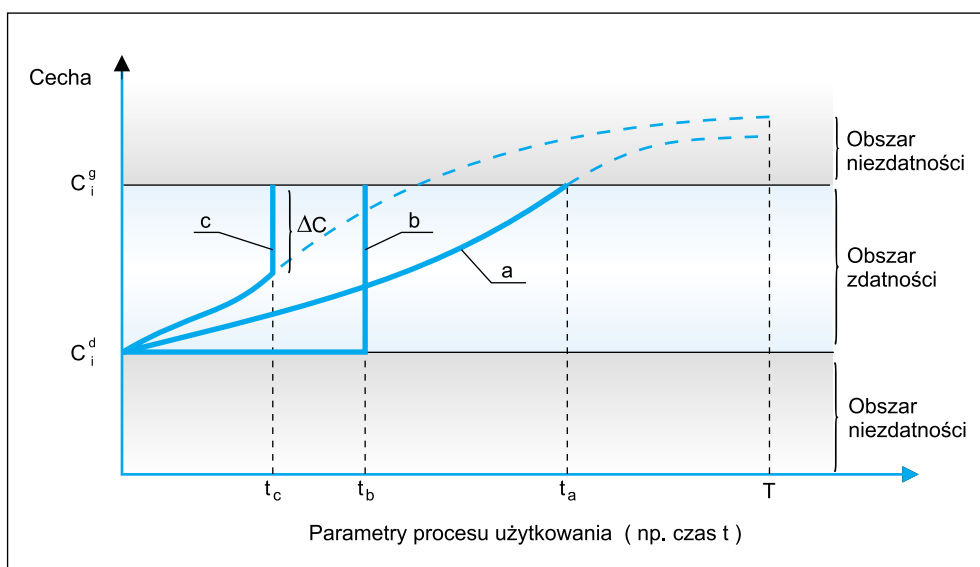
tu nazywa się procesem powstawania niesprawności (uszkodzenia), a wynik tego procesu – niesprawnością (uszkodzeniem).

Ciągłe przejście ze stanu zdatności do stanu niezdatności występuje w przypadkach narastania skutków procesów fizykochemicznych, które prowadzą do uszkodzenia. Są to najczęściej następujące procesy: tribologiczne, starzeniowe, erozji, korozji, kawitacji, zmiany struktury materiału. Przykładem uszkodzenia stopniowego związanego z procesem tribologicznym może być stopniowe zużywanie się elementów konstrukcyjnych łożysk czy zmiana grubości pierścieni uszczelniających w labiryntach instalacji olejowej silnika turbinowego. Charakterystyczną cechą uszkodzeń stopniowych jest to, że są one skorelowane z parametrem użytkowania (PW) (czas, liczba zadziałań, liczba lądowań, liczba cykli przeciążeń itp.).

Nieciągłe przejście od stanu zdatności do stanu niezdatności elementu nazywa się uszkodzeniem nagłym. Uszkodzenia te są wynikiem zmiany cech w bardzo krótkim przedziale parametru użytkowania (PU). Często uszkodzenie nagłe powstaje w wyniku skumulowania się zmian w obszarze mikro (mikropęknięcia, zmiany korozyjne itp.). Przykładem uszkodzenia nagłego może



Rys. 5. Schemat stanów statku powietrznego i wpływ prac uzdatniających na zmianę stanu



być zerwanie, złamanie, pęknięcie spowodowane chwilowym przeciążeniem mechanicznym, cieplnym, ciśnieniowym itp. Przykład zmian cech powiązanych z tymi uszkodzeniami, z uwzględnieniem podziału na stopniowe, nagłe i chwilowe, przedstawiono na rys. 6.

Uszkodzone elementy można zaszerego-
wać do jednej z następujących grup:

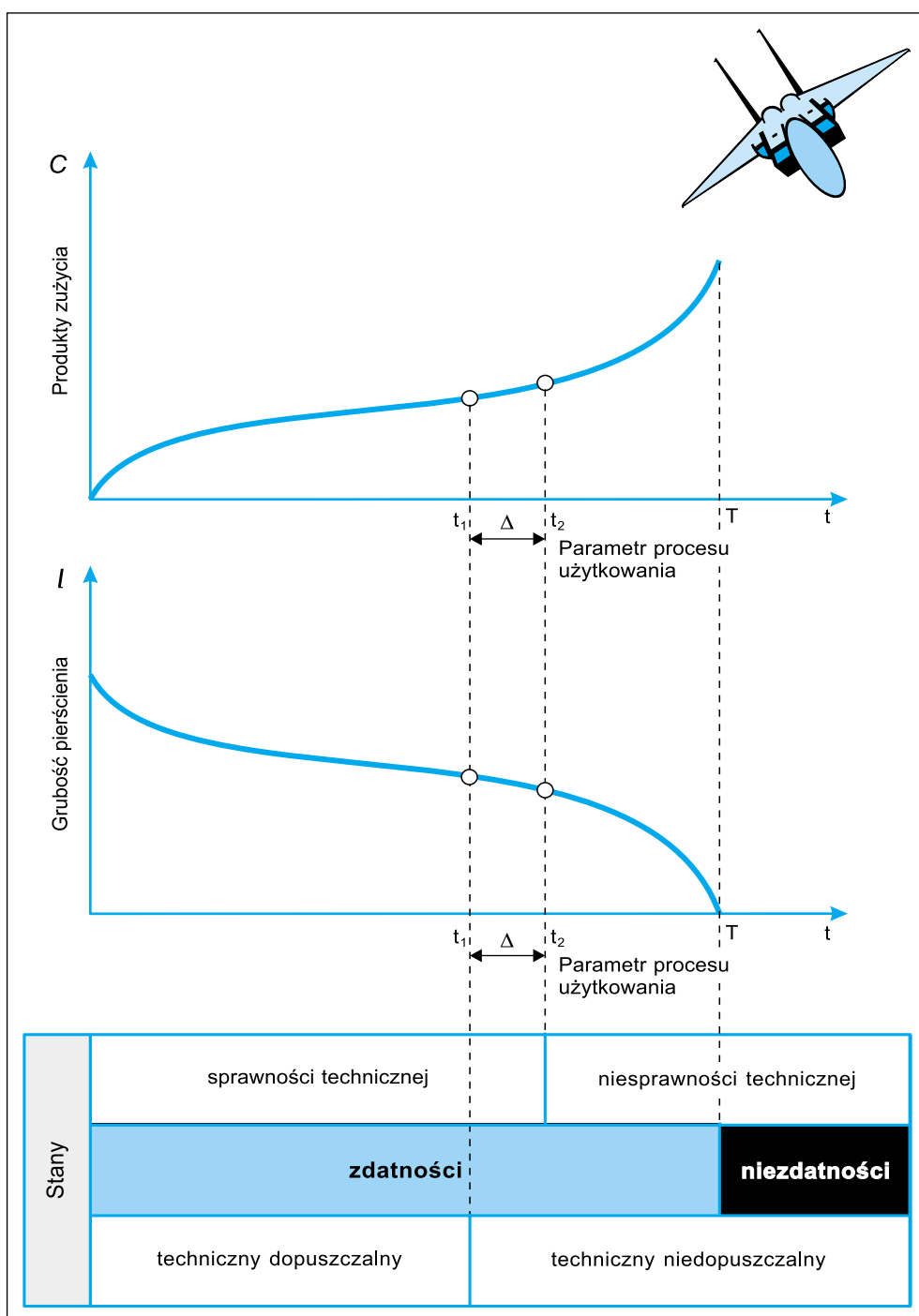
- elementy mające silnie skorelowane parametry określające stan zdatności z ilością parametru funkcjonowania;
- elementy mające słabo skorelowane parametry stanu zdatności z ilością parametru funkcjonowania. Można dla nich wyznaczyć obszar, w którym istnieje trajektoria stanu;
- elementy mające zerową korelację stanu zdatności z ilością parametru funkcjonowania. Proces uszkodzeń jest bez tzw. pamięci. Zespół zawierający takie elementy wymaga stosowania nadmiarów oraz aktywnych (w czasie rzeczywistym) układów diagnozujących.

W praktyce eksploatacyjnej wyróżnia się więcej stanów niezawodnościowych niż dwa

podstawowe – zdatny i niezdatny. Są one pochodną zmiany cech. Związki pomiędzy zmianami cech i stanów zilustrowano na rys. 7, na przykładzie śledzenia zmian koncentracji produktów zużycia wszystkich elementów tribologicznych w instalacji olejowej silnika turbinowego C i zmiany grubości pierścienia l uszczelniającego w silniku turbinowym. Parametrem procesu użytkowania jest tu czas pracy silnika. Koncentracja produktów zużycia C rośnie, a grubość pierścienia l maleje w funkcji czasu. W wyniku zjawisk tribologicznych może zaistnieć obszar Δ , w jakim zarysowuje się początek awaryjnego, a nawet katastroficznego zużycia. Ze względu na utrzymanie w przedziałach dopuszczalnych C i l , wyznacza się stan zdatności i niezdatności w sensie teoretycznym. W sensie praktycznym przedział Δ ze względu na bezpieczeństwo lotów wyznacza następujące stany:

- ◆ sprawności i niesprawności technicznej,
- ◆ technicznie dopuszczalny i technicznie niedopuszczalny.

Ocena czasu eksploatacji t_1 , wyznaczającego stan technicznie dopuszczalny, należy



Rys. 7. Schemat wyznaczania stanów niezawadnościowych z uwzględnieniem tzw. uszkodzenia stopniowego

Tabela 4

Zestawienie czynników mających wpływ na zapewnienie odporności SP na powstawanie niesprawności

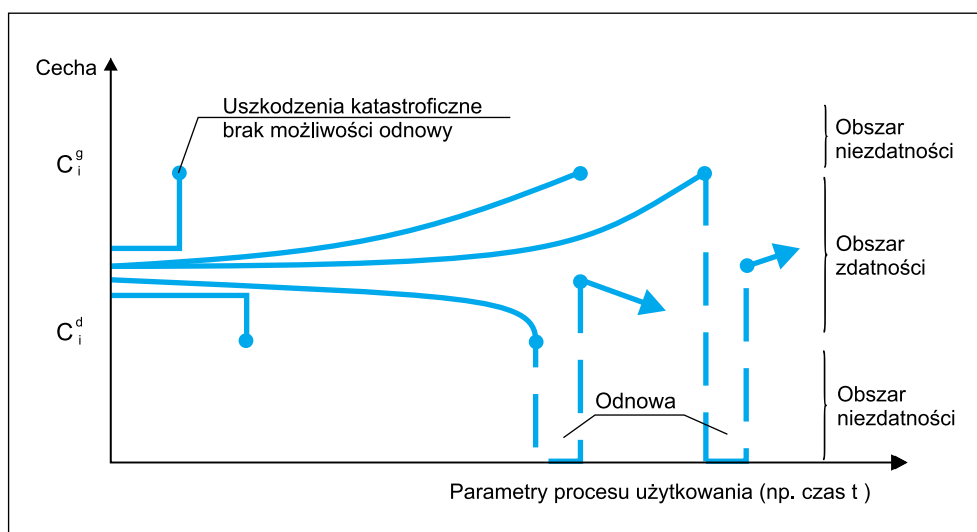
Czynniki zapewniające nieuszkodzalność OT		
projektowo-konstrukcyjne	technologiczne	eksploatacyjne
Racjonalne schematy konstrukcyjne	Odpowiednie procesy produkcji i kontroli	Organizacja użytkowania
Obliczenia wytrzymałościowe	Przygotowanie produkcji	Organizacja prac w zakresie utrzymania zdatności
Odpowiednie materiały	Stopień przygotowań kadr	Stosowanie odpowiednich: – metod – procedur – narzędzi
Uwzględnienie warunków eksploatacji	Odpowiednie oprzyrządowanie	Odpowiednia dokumentacja
Uwzględnienie możliwości odnowy	Liczba i jakość badań materiałów i podzespołów	Sprawny system zbierania informacji eksploatacyjnych
Odpowiednia diagnostyka	Warunki transportowania i magazynowania	Profilaktyka

do bardzo trudnych zagadnień diagnostyki technicznej.

Istotą eksploatacji jest także możliwość reagowania na powstałe niesprawności i uszkodzenia odnową realizowaną w podsystemie utrzymania zdatności SP. Odnowa przywraca stan zdatności w pełnym zakresie cech danego elementu, zespołu czy też całego SP albo stan częściowej zdatności z góry założonego parametru użytkowania (PU), np. czasu przelotu SP do bazy remon-

towej. Takie sytuacje schematycznie przedstawiono na rys. 8. Na rysunku zaznaczono symbolicznie wykonanie odnowy dla takich przypadków uszkodzeń, dla jakich ta odnowa jest możliwa.

Opis oraz badanie niesprawności i uszkodzeń, wykrycie rzeczywistej (lub rzeczywistych) przyczyny ich powstania ma kapitalne znaczenie dla doskonalenia konstrukcji lotniczych, doskonalenia metod, procedur i narzędzi utrzymania zdatności SP, a także



Rys. 8. Schemat uszkodzeń katastroficznych i stopniowych z możliwością odnowy

dla stosowania – odpowiedniej w formie i czasie – profilaktyki lotniczej. W tabeli 4 zestawiono główne czynniki zapewniające wysoki stopień nieuszkodzalności SP i jego części składowych. Czynniki te odgrywają istotną rolę w zapewnieniu niezawodności SP na wymaganym (zakładanym) poziomie. Czynniki te można zgrupować w trzech obszarach: projektowania i konstruowania, procesach wytwarzania i warunkach eksploatacji.

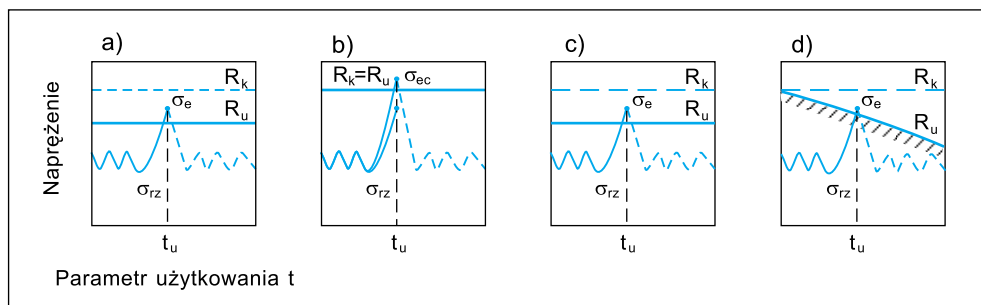
Uszkodzenia SP i jego zespołów w zdecydowanej większości objawiają się jako pęknięcia, urwania, wyłamania itp., powstałe w wyniku przekroczenia wytrzymałości rzeczywistej elementów składowych, na skutek oddziaływań mechanicznych, cieplnych lub elektrycznych. Na rys. 9 przedstawiono schematycznie cztery warianty przyczyn uszkodzeń z przekroczeniem wytrzymałości doraźnej elementu pod wpływem różnych czynników wymuszających.

Na rys. 9a zilustrowano sytuację, w której rzeczywiste czynniki wymuszające, działające na obiekt (zmienna losowa), powodują powstanie miejsca o mniejszej wytrzymałości doraźnej R_u niż wymagana dla rzeczywistych warunków eksploatacji R_e . Zakłada się że w procesie projektowania i konstruowania należy w pełni uwzględnić procesy optymalnych czynników wymuszających. Rzeczywistość eksploatacyjna weryfikuje te założenia. Uszkodzenia wynikłe z takiej przyczyny występują szczególnie

w początkowym okresie eksploatacji statków powietrznych.

SP powinien być użytkowany zgodnie ze swym przeznaczeniem, zgodnie z opracowaną dokumentacją eksploatacyjną, co oznacza oddziaływanie na niego ściśle określonych czynników roboczych w określonych przedziałach obciążeń (mechanicznych, cieplnych i elektrycznych, ogólniej elektromagnetycznych). Z różnych powodów, często w ekstremalnych warunkach użytkowania SP, może zaistnieć sytuacja, że wartość czynników wymuszających, np. obciążeń, przekroczy wartość przewidzianą przez konstruktora. Oznacza to, że w chwili t_u rzeczywiste naprężenia w strukturze przekroczą jego wytrzymałość i nastąpi uszkodzenie (urwanie, odkształcenie, deformacja struktury – rys. 9b). Przykładem takiej sytuacji mogą być pęknięcia struktury samolotów B-767 podczas lądowania (rys. 13).

Przyczyna uszkodzenia obiektu może tkwić także w procesie technologicznym wytwarzania lub remontu SP. Zmiana geometrii elementu, wada materiału, nieodpowiedni skład chemiczny oraz niewłaściwa struktura materiału, niedotrzymanie warunków obróbki mechanicznej i termicznej – to główne powody uszkodzeń natury technologicznej. Zasadniczym działaniem mającym na celu uniknięcie uszkodzeń z przyczyn technologicznych jest głęboka (wykorzystująca badania nieniszczące) oraz kompleksowa kontrola elementów i jakości mon-



Rys. 9. Schemat powstawania uszkodzeń wytrzymałościowych: σ_{rz} – naprężenia rzeczywiste; σ_e – naprężenia eksploatacyjne losowo powiększone; σ_{ec} – naprężenia eksploatacyjne chwilowe ponaddozuszczalne; R_k – wytrzymałość zakładana przez konstruktora; R_u – wytrzymałość rzeczywista; t_u – moment uszkodzenia

tażu zespołów, w zasadzie eliminująca z produkcji lotniczej metody statystycznej kontroli jakości. Na rys. 9c przedstawiono schemat zaistnienia uszkodzenia w momencie t_u w wyniku przekroczenia dopuszczalnych eksploatacyjnych obciążeń σ_e rzeczywistej wytrzymałości, mniejszej od przewidywanej przez konstruktora, co było następstwem wady technologicznej, która obniżyła tę wartość do R_{Σ} . Klasycznym przykładem takiego uszkodzenia jest uszkodzenie, które doprowadziło do katastrofy samolotu *Il-62M* (rys. 15). Wady technologiczne rzutują na niezawodność początkową obiektu.

Już wcześniej wspomniano o uszkodzeniach powstałych w wyniku ciągłych procesów degradacyjnych, czyli nieodwracalnych procesów prowadzących do zmiany własności fizykochemicznych elementów. Procesy te powodują zmniejszenie doraźnej wytrzymałości R_u , wskutek czego w dowolnej chwili t_u przewidywane i dopuszczalne obciążenie eksploatacyjne może przekroczyć wartość R_u (rys. 9d), doprowadzając do powstania uszkodzenia. Niedopuszczaniu do powstawania takich uszkodzeń służy dobrze rozwinięta diagnostyka techniczna.

Uszkodzenia są w konsekwencji wynikiem degradacji elementu lub elementów wchodzących w skład systemu (zespołu, całego SP). Degradacja jest konsekwencją trwania procesów starzeniowych, obciążeń mechanicznych, cieplnych i innych. Uszkodzenia powstałe w wyniku degradacji mają bezpośredni wpływ na niezawodność, bezpieczeństwo, gotowość i efektywność systemów lotniczych.

Niezawodność, niesprawności i uszkodzenia

Pokazany na rys. 6 przykład c jest reprezentatywny dla dowolnych typów uszkodzeń będących przyczyną niesprawności. Kiedy składowa degradacji stopniowej będzie stała, to krzywa *c* przybierze kształt krzywej *b* opisującej uszkodzenie nagłe. Kiedy skła-

dowa degradacji nagłej może być pominięta, a składowa degradacji stopniowej będzie zmienna, to krzywa *b* przybierze kształt krzywej *a*.

Zatem dla krzywej typu *c* (rys. 6) niezawodność mierzona prawdopodobieństwem zdatności $R_u(t)$ w czasie t będzie równa iloczynowi prawdopodobieństw dwóch możliwych procesów: nagłej $R_n(t)$ i stopniowej degradacji $R_s(t)$.

$$R_u(t) = R_n(t) \cdot R_s(t) \quad (1)$$

Ponieważ czas zdatności do wystąpienia uszkodzenia podlega prawu rozkładu wykładniczego, a czas do uszkodzenia – prawu rozkładu normalnego, to $R_u(t)$ opisuje następujące wyrażenie:

$$R_u(t) = e^{-\lambda t} \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\tau-T)^2}{2\sigma^2}\right] d\tau \quad (2)$$

gdzie λ i T są parametrami rozkładów. Równanie (2) pozwala na zobrazowanie zmian niezawodności w funkcji czasu, o ile znane będą parametry λ i T (rys. 10).

Do czasu t_1 niezawodność R_u zmienia się zgodnie z prawem wykładniczym, bo $R_s(0 < t < t_1) = 1$. Po osiągnięciu czasu t_1 niezawodność elementu zaczyna się zmniejszać intensywniej ze względu na składową rozkładu normalnego.

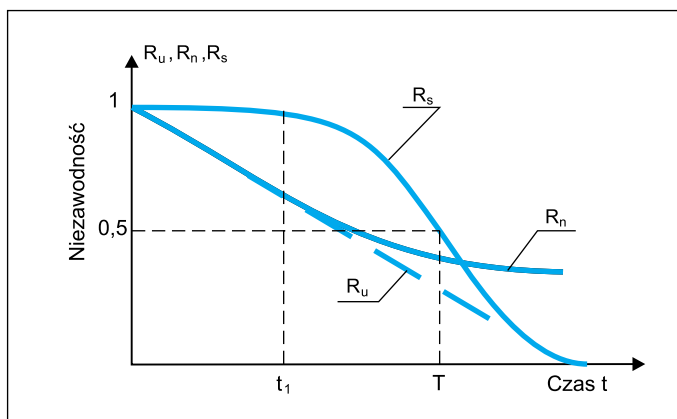
Uwzględniając podstawowy związek niezawodności R z zawodnością Q ($R + Q = 1$) i oznaczając intensywność uszkodzenia przez λ_u , można zawodność elementu, który może ulec uszkodzeniu, wyrazić za pomocą wzoru:

$$\begin{aligned} Q_u(t) &= \\ &= 1 - R_u(t) = 1 - e^{-\lambda t} \cdot \exp\left[-\int_0^t \lambda_u(\tau) d\tau\right] = \\ &= 1 - \exp\left[-\lambda t - \int_0^t \lambda_u(\tau) d\tau\right] \end{aligned} \quad (3)$$

Dla wielu praktycznych obliczeń wystarczy wziąć pierwszy wyraz szeregu Taylora, by otrzymać:

$$Q_u(t) \approx \lambda t + \int_0^t \lambda_u(\tau) d\tau \quad (4)$$

Rys. 10. Niezawodność elementu na uszkodzenia. Przykład stopniowej i nagłej degradacji elementu



Celem diagnostyki technicznej jest przewidywanie stanu technicznego obiektu i niedopuszczenie do powstania niesprawności dla tych wszystkich przypadków, kiedy degradacja obiektu nosi znamiona degradacji stopniowej.

Niech obiekt nosi cechę C (np. stopień zużycia mierzony koncentracją produktów zużycia w instalacji olejowej silnika czy też instalacji hydraulicznej systemu sterowania statkiem powietrznym) o intensywności zmiany $\gamma = dC/dt$, a parametrem eksploatacji niech będzie czas. Jeśli zmiana cechy C jest liniowa, to $\gamma = \text{const}$. Niesprawność powstaje po osiągnięciu $C_{dop.}$, co oznacza przejście obiektu w stan niesprawności (uszkodzenia). Stan początkowy i końcowy zbioru obiektów charakteryzują funkcje gęstości – stanu początkowego $\phi(C)$ i stanu końcowego $f(t)$. Jeżeli spojrzymy na rys. 11a, to zobaczymy, że obiekt nr 1 ma najkrótszy resurs (trwałość) T_1 . Resurs grupy obiektów można oszacować jako wartość oczekiwaną T_o . W rzeczywistości wiele czynników wpływa na to, że funkcja $f(t)$ nie ma rozkładu normalnego. Najistotniejszym pozytywnym czynnikiem jest najczęściej proces obsługi i diagnostyki (w skrócie obsługa technicznych – OT) – rys. 11b. Łatwo można wyznaczyć wartości średnie γ_{sr} i T_{sr} .

$$T_{sr} = (C_d - C_o) / \gamma_{sr} \quad (5)$$

Wartość T_{sr} jest medianą funkcji $f(t)$ dzielącą rozkład na dwa równe pola, gdzie: T_o –

wartość oczekiwana, σ – odchylenie standardowe $T_d = T_o - 3\sigma$ wyznacza pole zawodności.

FIZYCZNE I CHEMICZNE ZJAWISKA NIESPRAWNOŚCI I USZKODZEŃ

Zjawiska destrukcji elementów obiektów technicznych

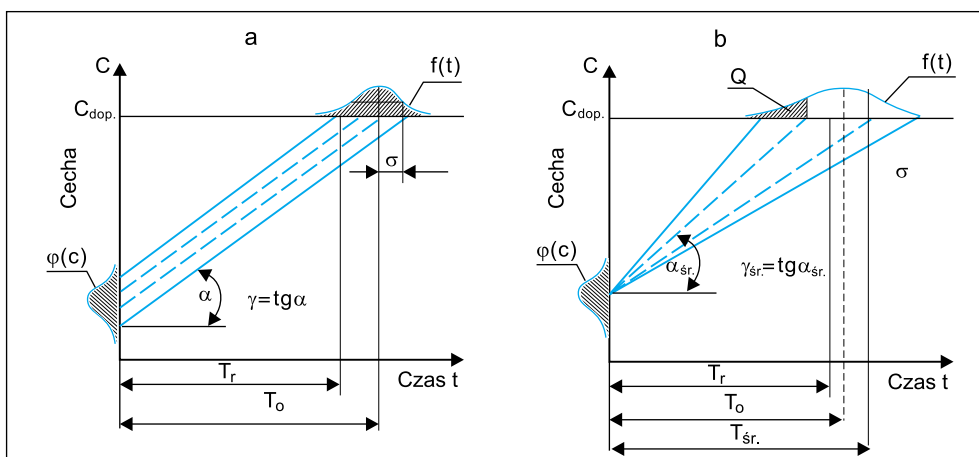
Podstawowym czynnikiem powstawania niesprawności i uszkodzeń jest destrukcja (degradacja) struktury konstrukcyjnej i materiału elementów SP. Destrukcje inicjują czynniki zewnętrzne lub wewnętrzne poprzez różnego rodzaju zjawiska fizyczne i chemiczne.

Zjawiska inicjujące degradację i doprowadzające do stanu niesprawności czy też uszkodzenia można podzielić na:

- ♦ wewnętrzne (wynikające z czynności wykonywanych przez obiekt): mechaniczne, cieplne, elektryczne;
- ♦ zewnętrzne (wynikające z pracy, w założonym, często zmieniającym się otoczeniu): klimatyczne, chemiczne, biologiczne, wykonywania prac (np. usługowych), w wyniku użytkowania (niewłaściwego użytkowania) itp.

W wyniku działania tych czynników rozwijają się (lub rozwinąć się mogą) następujące procesy fizykochemiczne:

- tribologiczne, wywołujące zużywanie powierzchni elementów trących systemów tribologicznych;



Rys. 11. Schemat rozkładu degradacji obiektu o stałej intensywności (a) i z uwzględnieniem obsługi technicznych (b)

- powodujące kruche i zmęczeniowe pękanie elementów ST, czego konsekwencją w praktyce są pęknięcia, urwania, odkształcenia, złamania itp.;
- korozyjne, erozyjne;
- starzeniowe;
- powodujące zmianę struktury materiału (np. w wyniku przegrzania) lub delaminację (np. kompozytów).

Destrukcyjne czynniki mechaniczne

Praca SP lub otoczenie wywołuje działanie różnych sił statycznych lub dynamicznych (udary, drgania, wibracje, hałas). Siły statyczne – opory robocze, siły napędowe, siły bezwładności, siły sprężystości, siły dyspozycyjne (zwane oporami szkodliwymi) – zmieniają swój wektor co do modułu, miejsca przyłożenia czy też czasu ich wystąpienia. Często siły statyczne przekształcają się w zmienne o zróżnicowanej amplitudzie i częstotliwości, powodujące drgania, wibracje i hałas (ogólnie: drgania). Wpływ drgań charakteryzuje się stopniowym doprowadzaniem do niszczenia konstrukcji OT, nawet wtedy, gdy poziom drgań jest niski. Rozróżnia się zmęczeniowe pękanie niskocykliczne lub wysokocykliczne. Strumienie gazów mogą wywoływać takie zjawiska, jak erozja, kawitacja.

Destrukcyjne czynniki cieplne

Destrukcyjne czynniki cieplne wywołują przemiany energetyczne jednej postaci energii w inną lub wytwarzanie energii (spalanie paliwa). W wyniku nagrzewania się elementów – poprzez konwekcję albo oddziaływanie strumienia gazów – mogą występować natychmiastowe lub stopniowe zmiany w materiałach (w strukturze lub składzie chemicznym, przy czym ich szybkość zwiększa się ze wzrostem temperatury do czwartej potęgi po przekroczeniu wartości temperatury dopuszczalnej). Pod wpływem temperatury maleją mechaniczne własności tworzyw sztucznych, gum i kompozytów. Destrukcyjne czynniki cieplne powodują starzenie się tych materiałów. To starzenie może być przyspieszane w wyniku oddziaływania pola elektromagnetycznego i obciążeń mechanicznych.

Destrukcyjne czynniki chemiczne i biologiczne

Destrukcję elementów SP mogą wywoływać związki chemiczne i biologiczne powstające w czasie pracy obiektu bądź pochodzące z otoczenia. Czynniki te powodują różne formy korozji.

Destrukcyjne czynniki eksploatacyjne

Zalicza się do nich niewłaściwe działania personelu w podsystemach użytkowania i utrzymania zdatowności SP. Dużą rolę odgrywa tu człowiek – jego przygotowanie fachowe, predyspozycje, odpowiedzialność. Pewien wpływ na powstawanie tych czynników mają metody, procedury i narzędzia stosowane w czasie eksploatacji.

Procesy zużywania tribologicznego

Zużywanie utleniające. Jest to najpowszechniejszy z procesów chemiczno-mechanicznych mających wpływ na procesy zużycia. Polega na sukcesywnym tworzeniu i usuwaniu warstewki tlenku. Proces ten ma przebieg ustabilizowany jeśli szybkość tworzenia tlenku równa jest szybkości jego niszczenia. Temu procesowi zużycia można zapobiegać, stosując odpowiednio dobrane materiały bądź też modyfikując właściwości warstwy wierzchniej.

Zużywanie ściernie. Ten rodzaj zużycia zaliczyć można do zużycia mechanicznego (czasami również do procesu chemiczno-mechanicznego). W zależności od twardości ziarna i materiału odkształcanego mówi się bądź o mikroskrawaniu, bądź o bruzdowaniu.

Zużywanie zmęczeniowe. W procesach tribologicznych zasadniczo wyodrębnia się dwa typy zużycia zmęczeniowego – pitting i spalling. Różnią się one efektami, gdyż ich przyczyny są identyczne. Zużycie przez zmęczenie polega na cyklicznym obciążaniu warstwy wierzchniej. Powoduje to znaczną koncentrację naprężeń tuż pod powierzchnią. Im mniejsza powierzchnia styku, tym te naprężenia są wyższe. W wyniku uplastycznienia i innych efektów zmęczeniowych dochodzi do oddzielenia się bądź grudek (pitting), bądź płatków metalu (spalling). Zapobieganie efektom zmęczenia warstwy wierzchniej polega na jej utwardzaniu i doborze środka smarnego. Odpowiednio dobrany środek smarny znacznie obniża lokalne naprężenie.

Zużywanie odkształceniowe. Zużycie odkształceniowe polega na zużyciu elementów – zmianie ich geometrii – w wyniku tarcia i występowania naprężeń przekraczających granicę plastyczności. Przeciwdziałanie polega na odpowiednim doborze materiałów, a także środka smarnego.

Procesy korozyjne

Konstrukcje SP odporne na korozję w jednym miejscu mogą być nieodporne na nią w innym. W agresywnych środowiskach mogą występować w elementach konstrukcyjnych różne postacie korozji, np. korozja wżerowa, korozja międzykrystaliczna czy korozja naprężeniowa.

Korozja wżerowa (elektrochemiczna) niszczy powierzchnię i objętość elementu. Korozja międzykrystaliczna rozprzestrzenia się wzdłuż granic ziaren metali lub ich stopów i nie jest widoczna. Ujawnia ją dopiero spadek właściwości mechanicznych materiału lub badanie ich szlifów. Czasami można ją wykryć za pomocą defektoskopii kolorowej. Korozja tego rodzaju jest bardzo niebezpieczna, ponieważ zachodzi bardzo szybko, głęboko niszczy materiał i jest trudna do wykrycia podczas przeglądów. Podatne na tę korozję są między innymi stopy aluminium typu dural oraz stale nierdzewne.

Korozja naprężeniowa zachodzi pod wpływem jednoczesnego oddziaływania środowiska korozyjnego oraz naprężeń rozciągających. Jest jedną z najbardziej niebezpiecznych postaci korozji, albowiem w warunkach eksploatacji konstrukcji rozwija się w sposób utajony. Tworzą się liczne i niemal niedostrzegalne mikroszczeliny, czyli pęknięcia o przebiegu prostopadłym do kierunku działania naprężeń, rozwijające się w miarę upływu czasu w głąb materiału, podczas gdy na powierzchni nie obserwuje się żadnych oznak procesu niszczenia. Naprężenia niszczą ochronną warstwę tlenków w mikroszczelinach, w związku z czym proces korozji nie może zostać zahamowany. Naprężenia, przy których występuje koro-

zja naprężeniowa, są znacznie mniejsze od naprężeń powodujących pękanie części wykonanych z tego samego materiału, lecz obciążonych w warunkach niekorzystnych. Niejednokrotnie zniszczenie następuje w warunkach braku obciążenia, jedynie pod wpływem naprężeń własnych.

Korozja elementów konstrukcji może przyczynić się do obniżenia trwałości zmęczeniowej konstrukcji, jak również powodować pęknięcia jednorazowe.

Destrukcyjna kompozytów

Pod wpływem działania obciążeń statycznych – krótko- i długotrwałych, zmęczeniowych i cieplnych w strukturze kompozytów mogą rozwijać się różne uszkodzenia strukturalne, takie jak pęknięcia poprzeczne żywicy i włókien czy rozwarstwienia (delaminacja). Uszkodzenia te wywołują stopniową degradację właściwości mechanicznych kompozytu, co objawia się obniżeniem własności wytrzymałościowych, zmianami gęstości materiału, wartości współczynników tłumienia drgań itp. Zmiany te mogą zachodzić czasami w obszarze obciążeń uznawanych za dopuszczalne.

Podczas eksploatacji statku powietrznego, do którego budowy użyto materiałów kompozytowych, trzeba uwzględniać destrukcyjne oddziaływanie zmian temperatury. Dla małych zmian pola temperatur termiczne zachowanie materiału kompozytowego jest zasadniczo takie samo jak dla materiałów jednorodnych, dla silniejszych zmian obserwuje się powstawanie nieciągłości lokalnych, efektów krawędziowych i zmian mikrostrukturalnych.

Skutek termodynamiczny wywołany przez zmienne pole temperatury powoduje:

- zmianę rozszerzalności cieplnej;
- zmianę przewodności cieplnej;
- zmianę właściwości mechanicznych, również sprężystych.

W rzeczywistych warunkach eksploatacji zmiany te występują najczęściej jednocześnie.

PRZYKŁADY USZKODZEŃ STATKÓW POWIETRZNYCH

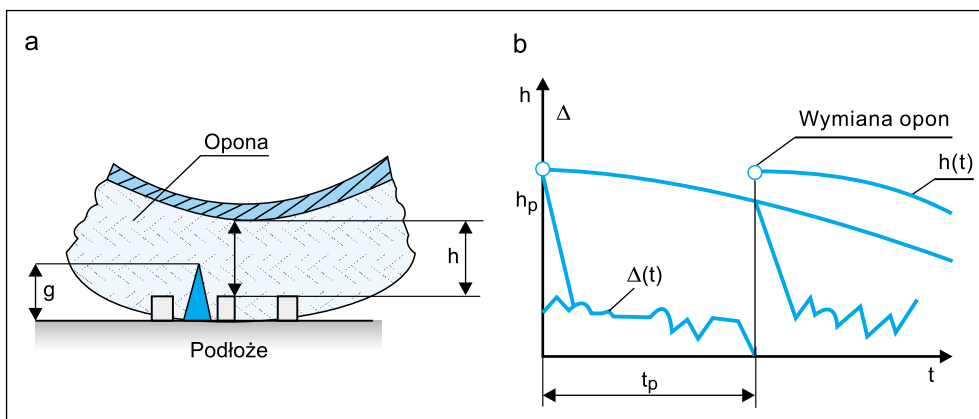
Warunkami koniecznymi zapewnienia bezpiecznych konstrukcji SP i jego zespołów są: odpowiednia wytrzymałość na stochastycznie zmienne obciążenia oraz stworzenie możliwości wykrywania uszkodzeń podczas diagnozowania w czasie rzeczywistym lub w czasie prac utrzymujących zdolność SP.

W strukturze kadłuba, skrzydeł, wlotów silników i usterzenia SP najczęściej uszkodzeń odnotowuje się w powłokach. Uszkodzenia te, typu mechanicznego, będące skutkiem kolizji z ciałami obcymi podczas startów i lądowań (odpryski betonu, gruntu, ptaki), powodują kosztowne przerwy w użytkowaniu statków powietrznych. Wykrycie takich uszkodzeń podczas przeglądów wykonywanych po każdym locie (przeglądy polotowe) nie sprawia większych trudności, natomiast ich niewykrycie może stwarzać, w konsekwencji, sytuacje bardzo kłopotliwe.

Uszkodzenie lokalne może w zasadniczy sposób zmienić przebieg procesu pękania zmęczeniowego uszkodzonej konstrukcji i wymuszać przeciwdziałanie niebezpiecznym skutkom. Takie uszkodzenie i rozwinięcie się pęknięcia zmęczeniowego na ogół znacznie skraca czas użytkowania SP.

Powstawanie uszkodzenia bieżnika opony koła SP

Na rys. 12 pokazano przekrój opony koła SP (rys. 12a) i zmianę grubości bieżnika h w wyniku naturalnego zużycia (procesów tribologicznych) w czasie startu i lądowania SP oraz wnikania na głębokość g ostrych ciał obcych, jakie mogą znaleźć się na pasie startowym (mogą to być kamienie, odpryski betonu, elementy mechaniczne itp.). Różnica grubości $\Delta [\Delta(t) = h(t) - g(t)]$ daje zapas wytrzymałości protektora. Na przykład w momencie t_h zużycie opony może być już na tyle duże, że wartość h_p może być porównywalna z wartością głębokości



Rys. 12. Model powstawania uszkodzenia w oponie SP: a – przekrój opony; b – zmiana wartości parametrów geometrycznych

wnikania ciał uszkadzających protektor. Jeżeli zaistnieje warunek $\Delta_p = h_p - g \leq 0$, następuje uszkodzenie nagłe. Wymiana opony przywraca sytuację wyjściową.

Pęknięcie kadłuba SP

Na samolocie pasażerskim B-767 po wylądowaniu zaobserwowano wyraźne pęknięcie kadłuba (rys. 13a) w okolicy wręgi STA 654 (rys. 13b). Analiza wykazała, że do tego zdarzenia eksploatacyjnego doszło dlatego, że dopuszczalna wytrzymałość elementu konstrukcji kadłuba (pomiędzy segmentami kadłuba STA 588 i STA 654) okazała się niewystarczająca dla naprężeń powstałych w momencie tzw. twardego przyziemienia przedniego podwozia SP. Twarde przyziemienie odznaczało się tym, że siła uderzenia przedniego podwozia dała taki moment siły, iż naprężenia rzeczywiste okazały się większe od dopuszczalnych (rys. 13c).

W tym przypadku analiza czynników wymuszających w rzeczywistych warunkach eksploatacji (lądowania) nie była wystarczająco wnikliwa. Niedoskonałość przeprowadzonych obliczeń wytrzymałościowych może wynikać np. ze skomplikowanej geometrii elementu, struktury konstrukcji. Prowadzi to do tego, że rzeczywista wartość czynników roboczych, np. obciążeń w chwili t_u

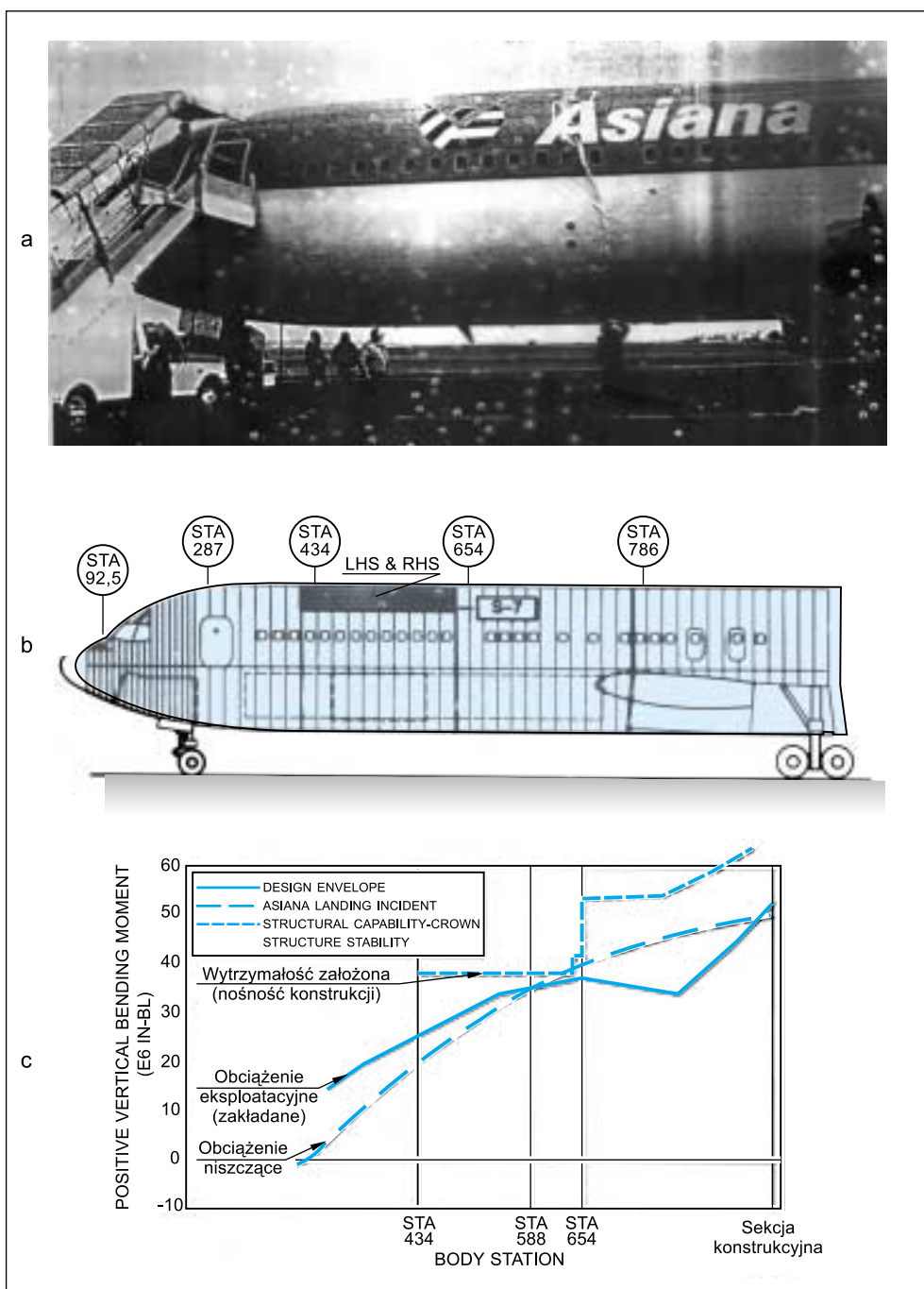
przekracza przyjętą przez konstruktora zdolność do przenoszenia obciążeń, w efekcie czego następuje uszkodzenie.

Przykład ten to niemal klasyczne potwierdzenie celowości tzw. **myślenia eksploatacyjnego**, z jednej strony konstruktorów, którzy muszą przewidzieć możliwe wartości prędkości kątowych opadania przedniej części kadłuba samolotu po przyziemieniu kół głównych podwozia, z drugiej strony – załogi samolotu, która nie może przekraczać zakładanej prędkości i sił przyziemienia samolotu.

To uszkodzenie jest klasycznym przykładem uszkodzenia mechanicznego pokazanego na rys. 9b.

Uszkodzenie podwozia SP

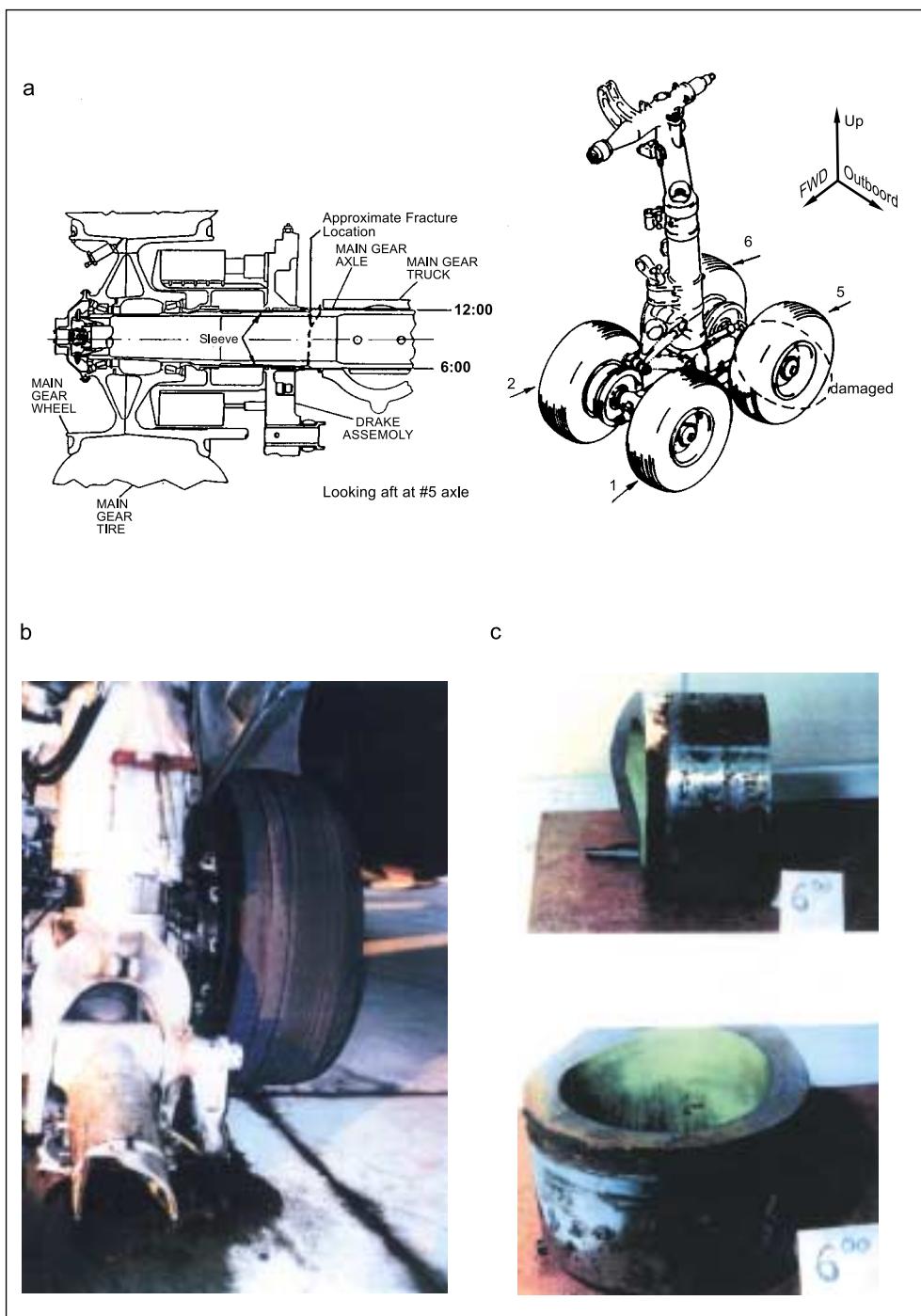
Modele uszkodzeń SP przedstawione na rys. 9d to przykłady uszkodzeń powstałych w wyniku przekroczenia obciążenia powyżej obniżonej doraźnej wytrzymałości, wynikłej z oddziaływania fizycznych procesów destrukcyjnych, jakimi mogą być korozja, erozja, zużycie tribologiczne czy też rozwijające się pęknięcie zmęczeniowe. Ten ostatni przypadek ilustruje uszkodzenie podwozia jednego z samolotów pasażerskich. W czasie startu pękła (rozczłonowała się) oś jednego z kół podwozia głównego (rys. 14b). Przyczyną tego było osłabienie prze-



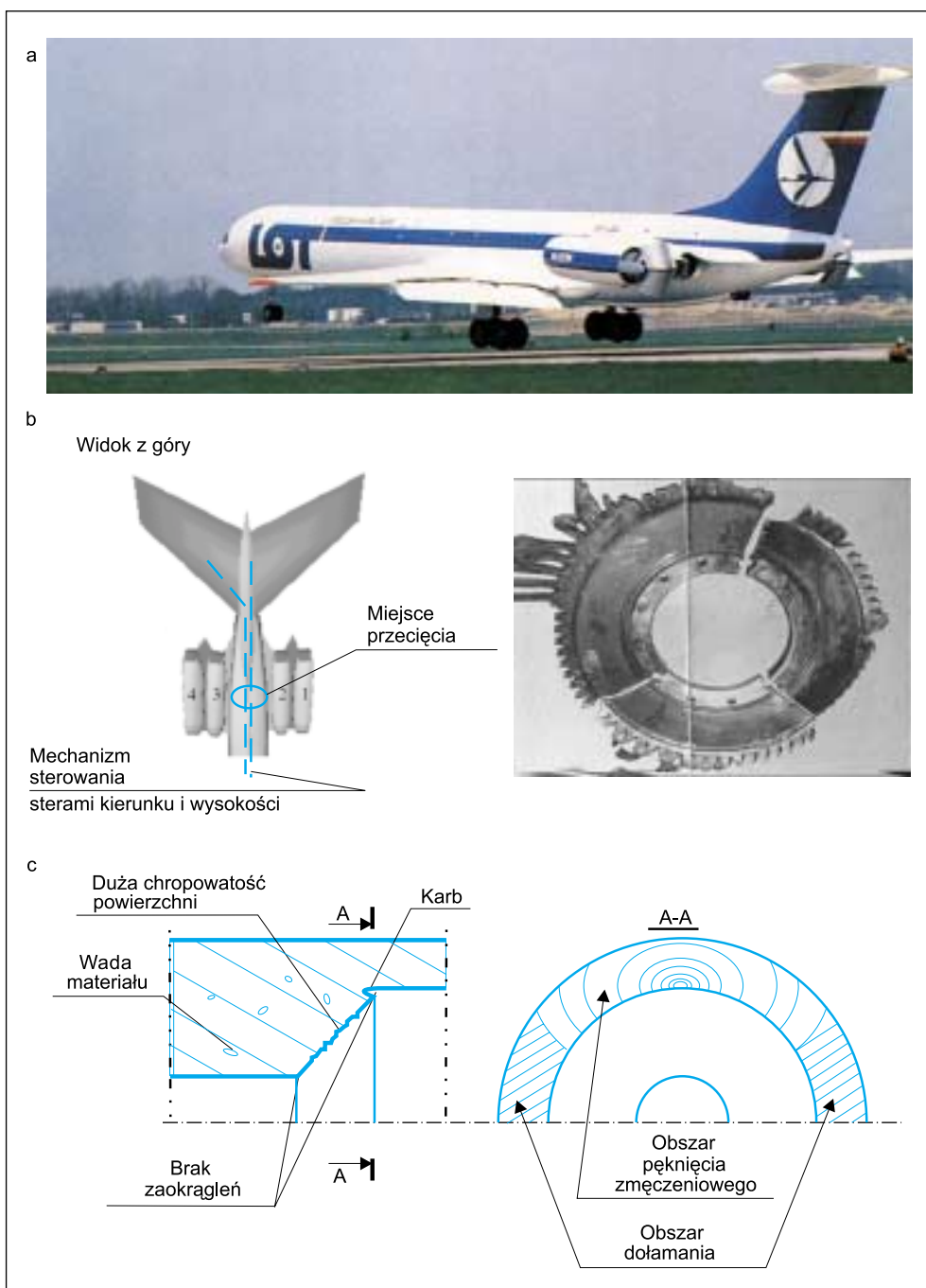
Rys. 13. Uszkodzenie SP w postaci pęknięcia kadłuba (rys. ze zbiorów B. Jancelewicza)

kroju poprzecznego osi tylnego koła podwozia głównego w wyniku rozwijającego się zmęczeniowego pęknięcia w miejscu zazna-

czonym na rys. 14a. Pęknięcie to zainicjowane zostało korozją chemiczną (na rys. 14c odznaczającą się ciemniejszym, brązowym



Rys. 14. Uszkodzenie podwozia samolotu pasażerskiego w wyniku zmęczeniowego pęknięcia osi koła (rys. ze zbiorów B. Jancelewicza): a – kadłub samolotu z widocznym pęknięciem; b – uszkodzone koło; c – miejsca korozji i przekroje pęknięcia zmęczeniowego



Rys. 15. Uszkodzenia samolotu *Il-62M Kopernik* PLL LOT: a – sylwetka samolotu; b – miejsce uszkodzeń silnika, mechanizmów sterowania i dysku turbiny; c – przekrój wału w miejscu uszkodzenia

kolorem). Samolot wylądował z uszkodzonym podwoziem i został usprawniony poprzez naprawę (wymianę).

Zmęczeniowe pęknięcie wału w silniku turbinowym

W 1980 r. czterosilnikowy samolot *Il-62M Kopernik* uległ katastrofie (pod Warszawą). Zginęło 87 pasażerów i załoga samolotu.

Przyczyną katastrofy było przecięcie popychaczy sterów wysokości i kierunku oraz uszkodzenie trzech silników (rys. 15). Uszkodzenie popychaczy i dwóch silników spowodowały fragmenty jednej z tarcz turbiny silnika nr 2. Do fragmentacji tarczy turbiny doszło w wyniku rozkręcenia turbiny ponad dopuszczalną wartość prędkości obrotowej ($n_{maks.}$) w związku z pęknięciem wału w tym silniku. Przyczyną pierwotną katastrofy było pęknięcie wału, a to z kolei miało podłoże w wadliwie opracowanej technologii wykonywania wału, stwarzającej możliwość popełnienia błędu wykonawczego i zaistnienia takiego błędu w procesie wytwórczym. Błąd ten nie został wykryty (a powinien) przez wewnętrzną kontrolę międzyoperacyjną.

W procesie technologiczno-wytwórczym popełniono następujące błędy:

- ♦ Zastosowano technologię wykonywania frezowania otworu wewnętrznego ze zmianą średnicy na długim wysięgniku, powodującą możliwość powstania niezamierzonego karbu, w którym może rozwinąć się pęknięcie zmęczeniowe. I tak właśnie się stało.
- ♦ W procesie wytwórczym nie obrobiono z odpowiednią dokładnością powierzchni wewnętrznej i odpowiednich promieni technologicznych. Użyto materiału z zanieczyszczeniami wewnętrznymi (gdzie była kontrola fabryczna?).

W wyniku narastającej liczby cykli pracy wału (zmiennych obciążeń) zarodkowane w karbie mikropęknięcia rozwinęły się w pęknięcie zmęczeniowe, doprowadzając

do katastrofy lotniczej. Z tej katastrofy wyciągnięto wnioski: zmieniono technologię wytwarzania wałów, opracowano i wdrożono odpowiednią diagnostykę wałów eksploatowanych silników. Zabrakło umiejętności myślenia eksploatacyjnego.

Zmęczeniowe pęknięcie komory ciśnieniowej

W dniu 12 sierpnia 1985 r. doszło do największej katastrofy lotniczej. Uległ jej samolot *B-747* linii lotniczej JAL, przystosowany do lotów na krótkie odległości z dużą liczbą pasażerów. Zginęło ponad 500 pasażerów i załoga. Przebieg zdarzeń był następujący: po kilkunastu minutach lotu pilot odczuł trudności w sterowaniu samolotem. W rzeczywistości odpadł ster kierunku i pilot praktycznie nie mógł sterować samolotem. Udało mu się, poprzez sterowanie silnikami, utrzymać samolot w locie przez prawie 20 minut. *Odpadnięcie steru nastąpiło w wyniku rozerwania się tylnej przegrody kabiny ciśnieniowej (rys. 16). Przyczyną rozerwania było rozwinięcie się pęknięć zmęczeniowych, które zainicjowane zostały w wyniku wadliwej technologii remontu tylnej części kadłuba tego samolotu po jej niedużym uszkodzeniu eksploatacyjnym. Błąd w remoncie polegał na zastosowaniu pojedynczego nitowania, zamiast podwójnego, elementów wspomnianej komory ciśnieniowej.*

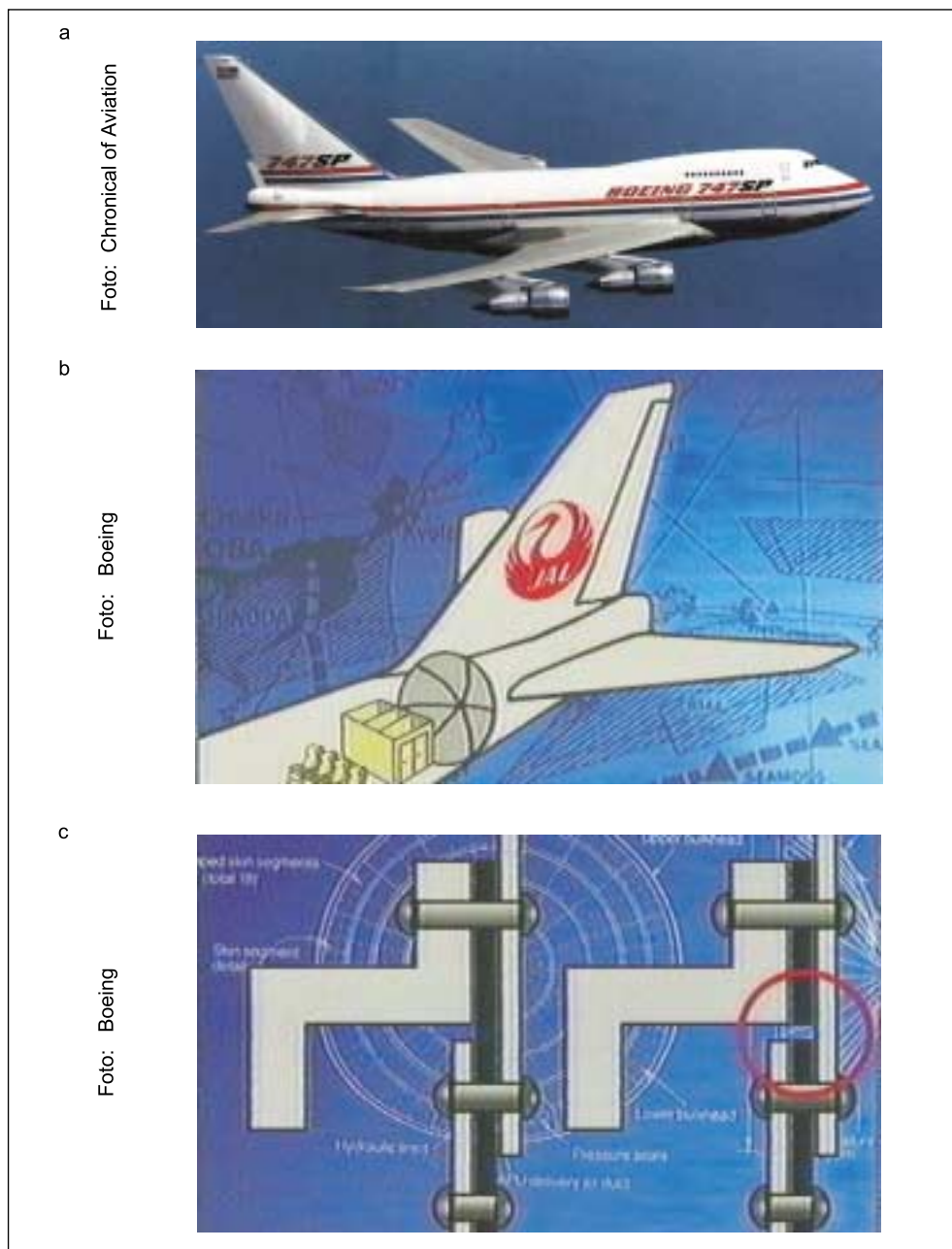
Dla pracowników wykonujących remont istotny był sam fakt wykonania połączenia. Zabrakło myślenia eksploatacyjnego – refleksji nad ewentualnymi skutkami tak oszczędnego nitowania.

Tribologiczne zużycie pierścieni uszczelniających w silniku turbinowym

Tribologiczne zużycie pierścieni uszczelniających pokazano na przykładzie silnika turbinowego *R11-F300* samolotu *MiG-21*. W wyniku obciążeń elementów silnika siłami powstającymi w czasie manewrów akrobacyjnych, pierścienie jednego z siedmiu

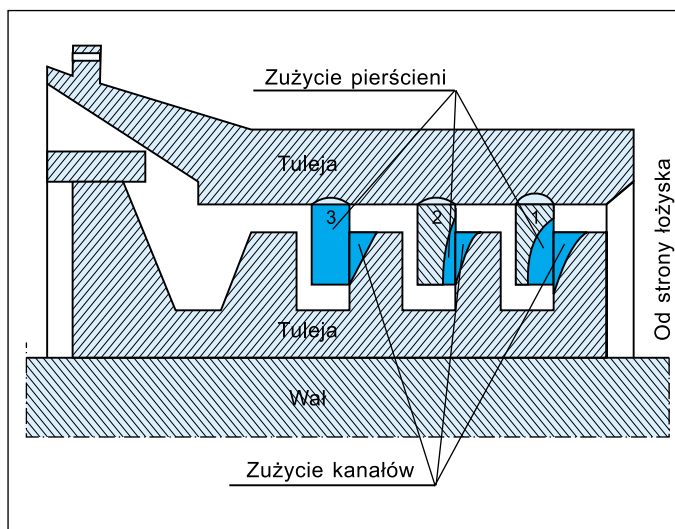
węzłów tribologicznych łożyskowania wałów silnika uległy przyspieszonemu zużyciu, co mogło spowodować rozszczelnienie instalacji olejowej i zatarcie silnika w powietrzu.

Schematyczny obraz zużytych pierścieni pokazano na rys. 17. Wykrywanie postępującego zużywania się takich pierścieni, jak i innych części w węzłach tribologicznych



Rys. 16. Elementy lotu i uszkodzenia samolotu B-747 JAL: a – sylwetka samolotu; b – widok tylnej przegrody; c – przykład dobrej i złej naprawy

Rys. 17. Tribologiczne zużycie pierścieni i kanałów w węźle labiryntowym silnika turbinowego R11F 300



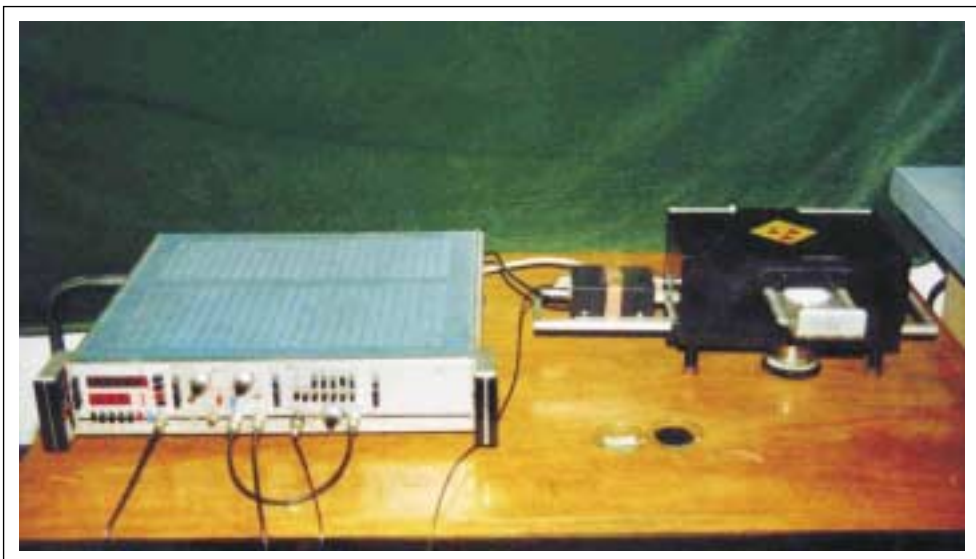
instalacji olejowej silników turbinowych umożliwia metoda diagnostyczna (wdrożona i stosowana w jednostkach lotniczych od kilkunastu lat) polegająca na badaniu produktów zużycia z wykorzystaniem metody rentgenowskiej fluorescencji radioizotopowej (XRF) opracowanej w ITWL (rys. 18 i rys. 19).

Pęknięcia korozyjne pompy olejowej lotniczego silnika turbinowego

Wada materiału – elektronu, z którego wykonany jest korpus pompy olejowej w instalacji olejowej silnika R11-F300, spowodowała rozwinięcie się korozji międzykrystalicznej. Spowodowało to podczas lotu „wyciśnięcie” oleju przez powstałe szczeliny



Rys. 18. Zestaw laboratoryjny do badania produktów zużycia węzłów tribologicznych w systemach olejenia i w układach hydraulicznych statku powietrznego oparty na metodzie spektrometrycznej



Rys. 19. Zestaw polowy do badania produktów zużycia węzłów tribologicznych stosowany w jednostkach lotniczych

ny (po 20 minutach) i w konsekwencji zatarcie łożysk silnika i jego wyłączenie się.

Pęknięcie klapy skrzydła samolotu

Typowym przykładem zmęczeniowego pęknięcia konstrukcji SP może być pęknięcie klapy skrzydła samolotu *MiG-21*. Przyczyna tkwiła w błędzie konstrukcyjnym. Uszkodzenie powstało na dobrze widocznej powierzchni klapy. Rozwijało się ze stałą prędkością. Jest to typowy przykład pęknięcia bezpiecznego.

Bibliografia

1. Borgoń J., Barszcz P., Klimaszewski S.: *Ocena stanu technicznego jednym z elementów procesu zwiększania zasobów płatowców statków powietrznych. „Problemy Eksploatacji”* 4/2001 (43), 2001.
2. Kłysz S.: *Szacowanie trwałości wybranych mate-*

rialów i elementów konstrukcji lotniczych w zakresie rozwoju pęknięć zmęczeniowych. Prace naukowe ITWL, z. 5, Warszawa 1999.

3. Kustroń K.: *Badanie procesu degradacji struktury wysoko obciążonego połączenia metal-kompozyt polimerowy w procesie eksploatacji. Rozprawa doktorska. ITL i MS PW, Warszawa 2001.*
4. Lewitowicz J.: *Podstawy eksploatacji statków powietrznych-staek powietrzny i elementy teorii. Wyd. ITWL, Warszawa 2001.*
5. Migdalski J.: *Inżynieria niezawodności. Poradnik. Wyd. ZETOM, Warszawa 1992.*
6. Szala J.: *Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. Wyd. ATR, Bydgoszcz 1998.*
7. Szala J.: *Zmęczeniowe pękanie materiałów i konstrukcji – rozwój nauki i zastosowań praktycznych. ZEM, z. 2 (126), 2001.*
8. Szczerek M., Wiśniewski M.: *Tribologia – tribotechnika, Wyd. ITE, Radom 2000.*
9. Ważyńska-Fiok K.: *Podstawy teorii eksploatacji i niezawodności systemów transportowych. Wyd. PW, Warszawa 1993.*

The author, a professor of Air Force Institute of Technology, talks over ideas and models of airships inefficiency and damage, physical and chemical phenomena of inefficiency and damage, and he also presents examples of damages.