

HIPOTETYCZNA ROLA BRZOZY W SMOLEŃSKIEJ KATASTROFIE R. 2010

Gregory Szuladziński

Abstract

This paper considers the probability of collision of the aircraft wing with the tree in question, as well as possible effects of such a collision. Numerical considerations are conducted on the basis of kinematics and static strength. Dynamic aspects of a possible collision are treated qualitatively.

Keywords - Collision, disintegration, free flight.

Streszczenie

Poniższy referat rozważa prawdopodobieństwo zajścia kolizji między skrzydłem samolotu a drzewem a także ewentualne skutki takiej kolizji. Rozważanie ilościowe jest przeprowadzone na podstawie kinematyki ogólnej oraz statyki konstrukcji. Dynamiczne aspekty uderzenia są traktowane jakościowo

Słowa kluczowe – Zderzenie, zerwanie, lot swobodny.

1. WSTĘP

Poniższa praca powinna być widziana jako przyczynek do niektórych aspektów katastrofy. Chociaż tematy poruszane tutaj nie zawsze są istotne dla wyjaśnienia przebiegu wypadku, pomagają jednak zamknąć niektóre „ślepe uliczki” poprzez podanie liczb, podczas kiedy przedtem miały miejsce tylko argumenty jakościowe.

Często wymienianą zmienną jest odległość, którą może przebyć w powietrzu przedmiot odpadający z samolotu. Poniżej podane są pewne proste kryteria, które nie dają wprawdzie odpowiedzi, ale wskazują na granice, w jakich ta odpowiedź powinna się mieścić.

Jednym z obiektów niekończących się sporów jest rola drzewa przedstawionego na poniższym zdjęciu. W początkowej fazie dochodzenia wysunięto hipotezę, że ta ścięta brzoza była bezpośrednią przyczyną katastrofy (Raport MAK [1] i Raport Komisji Millera [2]). Przypuszczano mianowicie, że uderzenie skrzydła w brzozę spowodowało utratę znacznej części skrzydła i razem z tym stateczności lotu, co spowodowało rozbicie się o ziemię.

Dokładniejsze badania trajektorii lotu wykonane w międzyczasie wykazują, że do żadnego kontaktu między samolotem, a ową brzozą nie mogło dojść. Jednak kwestie związane z pilotażem i nawigacją są poza obszarem zainteresowania autora i jako takie nie podlegają rozwinięciu (lub ocenie) w niniejszym opracowaniu. W związku z tym uderzenie skrzydła w brzozę traktowane jest jak wydarzenie, które miało miejsce, a poniżej jest analizowany jego możliwy przebieg. Pod uwagę są brane następujące aspekty:



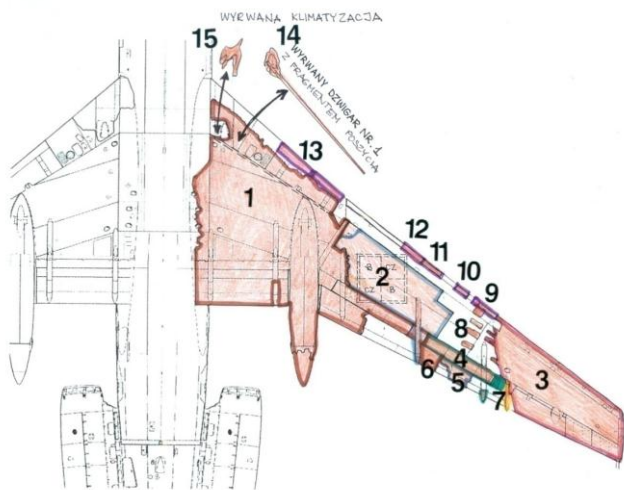
Rys. 1. Zdjęcie brzozy podejrzewanej o spowodowanie wypadku.

- lokalizacja miejsca uderzenia i odłamanego elementu,
- względna wytrzymałość statyczna i dynamiczna obydwu obiektów,
- specyfika niszczenia w wypadku smukłych obiektów,
- charakter zniszczenia skrzydła,
- wtórne skutki uderzenia. (iskwienie),
- wpływ sił aerodynamicznych.

Nadmienić trzeba, że w raporcie na temat wypadku wykonanym dla zespołu parlamentarnego [3], sposób zniszczenia skrzydła był interpretowany jako wynik wybuchu i że bardziej prawdopodobne wydało się, iż jego przyczyną był skoncentrowany materiał stały. Autor referatu podejmuje tutaj próbę niezależnego wątku myślenia, mianowicie czy można skojarzyć uderzenie drzewa z następującym po nim wybuchem paliwa.

Pożyteczne będzie przypomnienie rysunku z raportu [3], który dobrze ilustruje, skalę zniszczenia lewego skrzydła - Rys. 2.

Końcówka, która się znalazła w całości, jest tylko małą częścią (ok. 1/3) jego długości. Dalsza część skrzydła natomiast, stanowiąca ponad 1/3 jego długości, jest gruntownie zniszczona w sposób, dla którego zderzenie z ziemią było zupełnie niewystarczające. Większość dyskusji dotyczy tylko tej końcówki, podczas kiedy nawet nie wiadomo, jaki mechanizm spowodował jej oderwanie od reszty skrzydła. W tym raporcie została wypracowana odpowiedź na pytanie: *Jeśli końcówka została odcięta od skrzydła przez siły przyłożone w płaszczyźnie skrzydła, jaki wpływ mógł mieć ten akt odcięcia na zwolnienie lotu końcówki?* Zagadnienie to jest przedmiotem **Dodatku D**.



Rys. 2. Widok lewego skrzydła od dołu. Zestawienie odnalezionych części.

2. JAK DALEKO MOGŁA ULECIEĆ KOŃCÓWKA LEWEGO SKRZYDŁA?

W raporcie [3] pokazano położenie brzozy oraz położenie końcowego odcinka zniszczonego skrzydła po jego wylądowaniu. Odległość między tymi dwoma obiektami wynosi 111 m. Zważywszy, że punkt kolizji znajdował się na wysokości ok. 6 m (wysokość pozostałego pnia brzozy), zastanówmy się, jak daleko mógł ten segment polecieć.

Pierwszy krok w takim rozumowaniu to założenie, że nastąpiło łagodne odczepienie tej końcówki od reszty skrzydła bez żadnych gwałtownych wydarzeń. Jak daleko może dolecieć końcówka? To pytanie zostało szczegółowo omówione w **Dodatku C**. W tym wypadku końcówka ta miała pewnie kąt nachylenia skierowany do góry, co poprawiało trochę jej szanse w porównaniu z czysto poziomym lotem. Powiedzmy, że mogła ulecieć 40 m.

Następnym krokiem jest ocena tego, co wynika z faktu, że oderwanie części skrzydła nastąpiło na skutek uderzenia o nieruchomą przeszkodę. Znaczący to, że do przekroju poprzecznego końcówki skrzydła został przyłożony potężny impuls, popychający tę końcówkę wstecz. Bardziej szczegółowo omówiona została mechanika takiego uderzenia w **Dodatku D**. Tutaj wystarczy zauważyć, że końcówka została wprawiona w ruch w stronę przeciwną do ruchu samolotu. (plus ruch obrotowy). Jak daleko mogła ulecieć z powodu samego ruchu wstecznego? Powiedzmy, że tylko połowę tego, co w ruchu postępowym, a więc 20 m.

Podsumowując te dwie składowe: siła bezwładności spowodowała ruch w przód, natomiast siła uderzenia popchnęła końcówkę w tył. Prawdopodobny dystans wypadkowy był więc różnicą tych dwóch ruchów, czyli mniej więcej 20 m.

Należy przy tym pamiętać, że końcówka miała tendencję do obrotu wokół dwóch osi: osi wzdłużnej – z powodu momentu aerodynamicznego profilu, i osi pionowej – na skutek ścinania u nasady końcówki. Obydwa obroty potęgują skłonność do szybkiego przejścia końcówki skrzydła do lotu bezładnego. Wynik: niewielka odległość pokonana i raczej nieprzewidziane miejsce upadku.

Niewiele to ma wspólnego z odległością 111 m, wymienioną powyżej, przekreśla więc hipotezę o utracie końcowej części skrzydła przy zderzeniu z brzozą.

Widać też z powyższego, że oderwanie końcówki musiało nastąpić niedaleko przed punktem K, w którego pobliżu znaleziono końcówkę.

3. DYNAMIKA ZDERZENIA

W **Dodatku A** pokazano, że przy podejściu statycznym wytrzymałość skrzydła na ścinanie jest ok. 3 x większa, niż wytrzymałość drzewa. W uzupełniającym Dodatku B wywnioskowano, że wpływ sił aerodynamicznych na ewentualne złamanie skrzydła był mały. Jednak obliczenie statyczne jest tylko odnośnikiem, który daje pewne pojęcie, ale sam w sobie nie wystarcza. Chodzi o to, że możliwości niszczące obiektu poruszającego się wzrastają wraz z prędkością poruszania. Wystarczy przytoczyć przykład z ostatnich lat, kiedy podobny samolot wleciał po prostu w północną wieżę WTC w Nowym Jorku. Na ścianie budynku pozostał obrys samolotu. Główny element konstrukcyjny tej ściany stanowiły kolumny stalowe, gęsto postawione jedna obok drugiej. Przekrój kolumny był kwadratowy: 356 x 356 mm, pusty w środku, a najcieńsze ścianki miały ok. 7 mm grubości.

Dlaczego tak się stało? Prędkość samolotu oceniano na 700 km/h w momencie uderzenia w Wieżę Północną. To właśnie ta szybkość dała konstrukcji samolotu taką moc niszczącą. Bardziej skrajny przykład to cienki strumień wody, który przy dostatecznie dużej szybkości może ciąć metale, efekt uderzenia rośnie bowiem proporcjonalnie do energii kinetycznej na jednostkę powierzchni uderzonego obiektu.

Można przedstawić bardziej elementarne wytłumaczenie, dlaczego dynamika zmienia charakter uderzenia. Wyobraźmy sobie, że 20 silnych mężczyzn bierze skrzydło i pcha je krawędzią o drzewo. Rozsądne jest przypuszczenie, że w pewnym momencie blacha skrzydła zacznie wyginać się w bok, czyli wybaczać. Tego można oczekiwać przy obciążeniu statycznym, ale kiedy skrzydło leci z prędkością 270 km/h, sytuacja się zmienia. Blacha „nie ma czasu” się wybaczać, tzn. jej bezwładność poprzeczna zapobiega temu. Blacha tnie przeszkodę jak nóż.

W sumie należy przypuszczać, że szybkość skrzydła spowodowała, iż kilkakrotnie wzrosła jego wytrzymałość w porównaniu z tym, co zostało powiedziane w **Dodatku A**. Była więc wielka dysproporcja między wytrzymałością drzewa a skrzydła.

4. DWA SMUKŁE OBIEKTY

W raporcie [3] padło następujące stwierdzenie.

Jest też coś ważniejszego przy takim zderzeniu. Typowa kolizja „na krzyż” dwóch smukłych obiektów kończy się złamaniem lub ścięciem tylko jednego z nich. Jest nikła szansa, by obydwa obiekty zostały złamane. Znaczący to, że jeśli drzewo zostało ścięte, to skrzydło ocalało (z powierzchniowymi uszkodzeniami) i na odwrót. To powinno zamknąć dyskusję dotyczące ewentualnej roli brzozy w tym wypadku. Jeśli nawet Raport MAK ma rację i wbrew ostatnim badaniom był kontakt skrzydła z brzozą, to ani zmiana kursu nie była zauważalna, ani skrzydło wiele nie ucierpiało, więc rola brzozy powinna być zupełnie usunięta z rozważań.

Powyższe stwierdzenie może być dowiedzione na drodze wyłącznie statycznej, bez wnikania w komplikacje spowodowane aspektami dynamicznymi. Czytelnikom, którzy intuicyjnie mają wątpliwości w tej sprawie, którzy

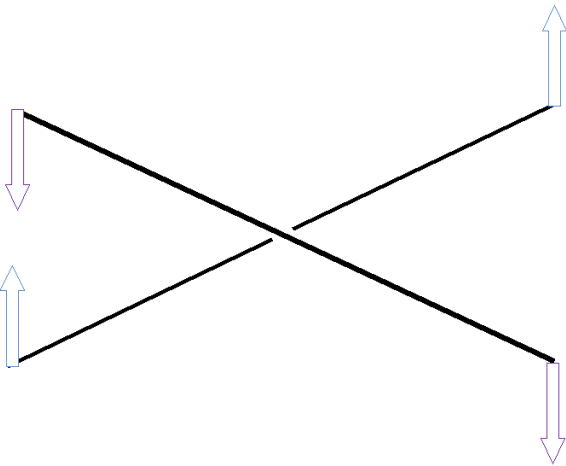
podejrzewają, że obydwa obiekty mogły się w efekcie złamać, zaleca się wykonanie doświadczenia, którego opis jest przytoczony poniżej.

Weź zapalną między palec wskazujący i kciuk, z lekką ją ściskając wzdłuż. To samo w drugiej ręce. Zbliż obydwa zapalaki tak, by się stykały w połowie długości i aby między nimi był kąt prosty. Naciskaj tak, by powodować złamanie. Tylko jedna z nich się łamie.

By się upewnić, powtórz doświadczenie 10 razy.

Dlaczego tak się dzieje? Mimo że obydwa obiekty są fabrycznie zrobione jako jednakowe, istnieją między nimi ledwie dostrzegalne różnice, spowodowane m.in. minimalnie różnymi własnościami materiału. Proces wzajemnego nacisku jest bardzo czuły i w chwili, gdy pierwsza zapalaka zaczyna się łamać, druga doznaje odciążenia.

Jedno z zastrzeżeń ograniczających prawdziwość powyższego stwierdzenia dotyczy lokalizacji punktu zderzenia – nie powinien być on zbyt blisko punktu zamocowania. Jeśli mówimy o wydarzeniu drzewo-skrzydło, to uderzenie w drzewo blisko jego podstawy czyni z niego sztywną przeszkodę terenową, nie smukły obiekt.



Rys. 3. Dwie belki, popychane w przeciwne strony.

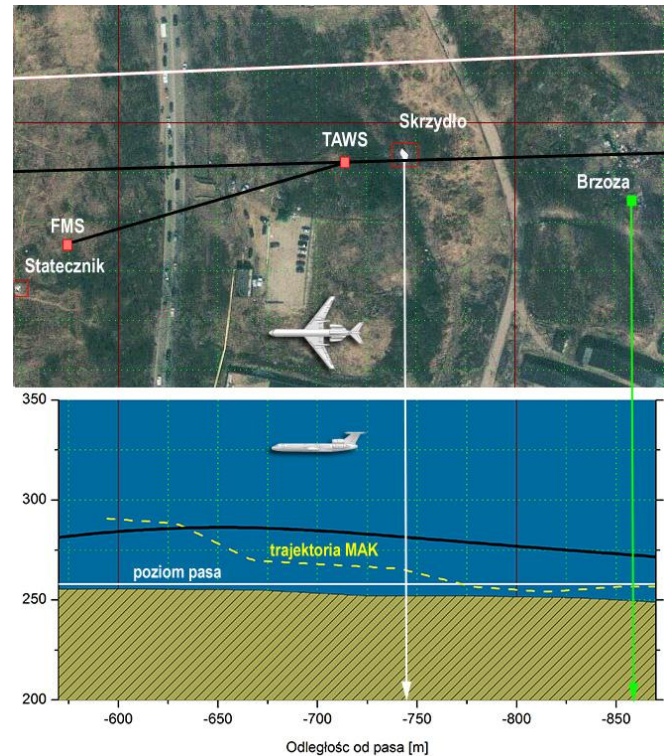
Wiele miesięcy przedtem, nim powyższe rozumowanie zostało zaprezentowane, prof. Binienda przedstawił symulacje używając *MES (Metody Elementów Skończonych)* i wykazał, że przy zadanej prędkości skrzydło było w stanie ściąć brzozę, a nie na odwrót. W świetle szerszej perspektywy ta symulacja jest uwidocznieniem tego, co musiało się stać. (Trzeba wspomnieć, że dostępne zdjęcia brzozy wykazują, jakby była ścięta tępym obiektem, ale związek tego z rozważanym wypadkiem nie jest pewny).

5. GDZIE NASTĄPIŁ WYBUCH NA SKRZYDLE WZGLĘDEM PUNKTU K?

Raport wykonany dla zespołu parlamentarnego [3] opisywał niektóre elementy tego, co się wydarzyło, w sposób ogólny. Wskazywał na wybuch w okolicy punktu K – por. Rys. 4. I choć przypuszczano, że stało się to przed punktem K, wyraźnego uzasadnienia brakowało.

Warto zastanowić się nad konstrukcyjnymi skutkami wybuchu, który spowodowałby rozbicie skrzydła i oderwanie końcówki. O ile sam wybuch może być traktowany jako momentalny, to widoczne skutki, jeśli chodzi o niszczenie skrzydła, potrzebują ułamka sekundy.

Powiedzmy, że zajęło to pół sekundy, czyli około 35 m lotu a więc tyle czasu upłynęło od momentu wybuchu do zrealizowania jego zapisanych skutków, tzn. zakrętu z jednoczesnym przechyłem. Ten proces zaczął być widoczny w punkcie K.



Rys. 4. Trajektoria samolotu, według ostatnich badań, jest oznaczona czarną linią. Górny wykres pokazuje ją w planie, a dolny w ewelacji. Punkt oznaczony jako TAWS, nazywany w skrócie punktem K to miejsce, gdzie kierunek lotu uległ gwałtownej zmianie. Na górnym zdjęciu ul. Gubienki po prawej, a ul. Kutuzowa po lewej stronie.

Oznacza to, że znowu dochodzimy do tego samego wniosku jak poprzednio, a mianowicie, że wybuch musiał nastąpić trochę przed punktem K.

6. MOŻLIWOŚĆ WYBUCHU SPOWODOWANEGO ZDERZENIEM

Jedna z ilustracji w raporcie wykonanym dla zespołu parlamentarnego [3] pokazuje, że po upadku na ziemię ok. 70% lewego skrzydła było zniszczone. Natura rozpadu i inne dane wskazują, że zniszczenia zostały spowodowane wybuchem w powietrzu. Ewentualne uderzenie kikutu skrzydła o ziemię mogło przyczynić się do ogólnego zniszczenia, ale byłby to tylko dodatek do wybuchu. Powstaje więc pytanie: czy zderzenie z brzozą mogło spowodować wybuch paliwa w zbiorniku na skrzydle.

Nie jest łatwo spowodować wybuch zbiornika przez mechaniczne uderzenie. Aby wywołać falę uderzeniową we wnętrzu, ścianka zbiornika powinna być popchnięta z prędkością naddźwiękową. Zawartością zbiornika na skrzydle w czasie lądowania mogły być głównie opary paliwa. Mieszanka powietrze-paliwo miała prawdopodobnie prędkość dźwięku niewiele różniącą się od powietrza, mianowicie 340 m/s w warunkach normalnych. Samolot poruszał się 270 km/h czyli 75 m/s tak, że fala uderzeniowa i detonacja z niej wynikła nie mogły mieć miejsca.

Jest jednak możliwe, że przy silnym uderzeniu mogło się pojawić iskrzenie z przyczyn dotychczas nieokreślonych.

(Taka możliwość powinna być rozważona w świetle szczegółów konstrukcyjnych, co nie zostało dokonane). Wtedy mogłaby powstać deflagracja mieszanki, która, choć charakteryzuje się wolniejszym spalaniem niż detonacja, jest też w stanie wywołać wybuch w zamkniętym zbiorniku. Zastanówmy się nad skutkami takiego hipotetycznego wybuchu. Ważna jest skala czasu, wobec tego trzeba wspomnieć, że zderzenie skrzydła z brzozą byłoby dla naziemnego obserwatora jednocześnie z wybuchem.

W tym wypadku silny puls ciśnienia wewnętrznego spowodowałby powstanie dużej siły poosiowej względem skrzydła, co by skłoniło końcowy segment do lotu w lewo od trajektorii. Nic takiego nie miało miejsca. Pamiętając, że większość skrzydła była zniszczona, scenariusz opisany w [3], a mianowicie obrót wokół osi podłużnej i skręt w lewo, powinien się zacząć zaraz za drzewem, a nie w punkcie K, dużo dalej. Również końcowy segment skrzydła nie miał szansy znaleźć się tam, gdzie dotarł, jak to opisano powyżej.

Jeśli założymy, że uderzenie brzozy spowodowało iskrzenie, które dopiero później wywołało wybuch w punkcie K, to lokalizacja ostatniego segmentu skrzydła nie jest niezgodna z takim scenariuszem.

Podsumowując: natychmiastowy wybuch paliwa na skrzydle, wynikający z uderzenia w brzozę, jest niezgodny z innymi okolicznościami. Nie można natomiast wykluczyć zapłonu zbiornika z pewnym opóźnieniem.

7. PODSUMOWANIE I DYSKUSJA

Referat ten nie stara się rozsądzić sprawy, czy uderzenie skrzydła w brzozę w rzeczywistości się zdarzyło. Uderzenie to jest traktowane tak, jakby rzeczywiście miało miejsce, a jego przebieg jest analizowany z kilku punktów widzenia. Niemniej jednak trzeba pamiętać, że to, co się stało z

końcówką skrzydła, było tylko częścią większego wydarzenia, mianowicie zniszczenia lewego skrzydła w powietrzu.

Odległość od brzozy znalezionej odcinka skrzydła, czyni hipotezę o utracie części skrzydła przy zderzeniu z brzozą, trzeba uznać za zupełnie nierealną.

Statyka wskazuje, że przekrój skrzydła jest ok. 3 x mocniejszy niż przekrój brzozy. Efekt dynamiczny powinien ten stosunek zwielokrotnić. Nie daje więc to brzozie żadnej szansy, by mogła urwać skrzydło. Niezależnie od tego mechanika techniczna wykazuje, że tylko jeden z dwóch zderzających się obiektów ulega złamaniu.

Wybuch paliwa na skrzydle, będący skutkiem wtórnym uderzenia w brzozę, jest mało prawdopodobny, ale nie można go wykluczyć, jeśli zaszedł z opóźnieniem.

Dodatek D wyjaśnia, jaki efekt mogło mieć odcięcie ostatniego segmentu skrzydła (nie wnikać, jakie przyczyny spowodowały to odcięcie) na lokalizację tego fragmentu.

Od wielu miesięcy, które upłynęły od czasu opublikowania pracy prof. Biniendy, trwają ciągle przewlekłe dyskusje na jej temat, pośrednio i bezpośrednio. Tylko mała część tych wypowiedzi, odnosząca się do siatkowania modelu stworzonego do analizy *MES*, miała trochę sensu. Większość innych stwierdzeń, które autor czytał, wskazywały, że dyskutanci nie mają wiele (lub wcale) doświadczenia w *MES*, zwłaszcza jeśli chodzi o

programy zaawansowane, zdolne pokazać rozpad konstrukcji. Większość stwierdzeń to ataki osobiste na prof. Biniendę oraz często pojawiające się wypowiedzi pochlebne na jego temat.

W zakończeniu autor wyraża nadzieję, że te uparte dyskusje na temat „brzoza – skrzydło” ucichną pod wpływem argumentów tutaj przedstawionych, a wyniki prof. Biniendy nie będą podawane w wątpliwość.

DODATEK A

Statyczna wytrzymałość obydwu obiektów.

W raporcie wykonanym dla zespołu parlamentarnego [3] zauważono, że „*Mimo bardzo przewlekłych dyskusji na temat: co było mocniejsze - brzoza czy skrzydło, nikt nie zrobił prostego obliczenia opartego o nominalną statyczną wytrzymałość. Zarówno dla brzozy jak i dla skrzydła ta wytrzymałość jest iloczynem efektywnego przekroju i wytrzymałości materiału na ścinanie. Od tego analiza powinna się zaczynać, zanim zostaną użyte metody zaawansowane*”.

Oto brakujące obliczenie.

Skrzydło

- Długość cięciwy mierzona w odległości 10,8 m od osi kadłuba (zgodnie z [2]), pomiędzy frontowym a tylnym dźwigarem, wzdłuż kierunku lotu: 2,34 m.
- Grubość pokrycia górnego i dolnego: 1,5 mm.
- Przybliżone pole przekroju poprzecznego:
 $A_1 = 2 \times 1,5 \times 2340 = 7020 \text{ mm}^2$.
- Wytrzymałość doraźna dla użytego duraluminium przy rozciąganiu: 444 MPa.

- Wytrzymałość doraźna dla użytego duraluminium przy ścinaniu: $0,577 \times 444 = 256,2 \text{ MPa}$.

- Siła niszcząca przekrój przez ścinanie:
 $P_1 = 7020 \times 256,2 = 1,8 \text{ MN}$.

Brzoza

- Prawdopodobna średnica: 440 mm (w opracowaniu [1] podana była jako 300-400 mm).
- Pole przekroju: $\pi \cdot (440)^2 / 4 = 152,053 \text{ mm}^2$.
- Wytrzymałość materiału na ścinanie: 4 MPa (*).
- Siła niszcząca przekrój:
 $P_2 = 4 \times 152,053 = 0,6082 \text{ MN}$.

(*) Wytrzymałość materiału na ścinanie z siłą działającą prostopadle do pnia jest trudna do ustalenia (w publikowanych danych jest wielki rozrzut). Według poszukiwań autora jest mało prawdopodobne, by wielkość ta przekroczyła 4 MPa i dlatego ta liczba została użyta.

Stosunek wytrzymałości statycznej skrzydła i drzewa

$$P_1/P_2 = 1,8/0,6082 = 2,96.$$

Uwagi

W powyższych obliczeniach nie uwzględniono, że zarówno dla skrzydła jak i dla brzozy aktywne jest dwukrotne pole przekroju. Nie ma to jednak wpływu na obliczony stosunek sił.

Wyjaśnienia dla skrzydła: jeśli chodzi o siły działające wzdłuż cięciwy, ważne jest przede wszystkim pokrycie. Dźwigary i podłużnice odgrywają tylko rolę pomocniczą i zostały pominięte w obliczeniach.

Wyjaśnienia dla drewna: jeśli chodzi o drewno konstrukcyjne (sezonowane), to np. normy australijskie

podają szereg gatunków w zakresie wytrzymałości na zginanie od 2,8 do 34,5 MPa.

Dla najsłabszego drewna z powyższych, wytrzymałość na ścinanie wynosi poniżej 13% wytrzymałości giętej. Dla najmocniejszego – tylko 7%. Przyczyna tej dysproporcji: przy obciążaniu siłą tnącą pojawiają się też naprężenia styczne, rozdzielające włókna wzdłuż pnia, a drewno jako materiał ortotropowy jest na to bardzo mało wytrzymałe. Drewno brzozy uchodzi za jedno z mocniejszych w porównaniu z innymi gatunkami. Drewno rosnące (zielone) ma mniejszą wytrzymałość od sezonowanego, ale większą elastyczność.

DODATEK B

Wpływ sił aerodynamicznych

Należy jeszcze wspomnieć o wpływie sił aerodynamicznych, które w wypadku skrzydła mają dwie główne składowe: wzdłuż cięciwy i prostopadle do niej. Jeśli chodzi o odłamywanie skrzydła w jego płaszczyźnie, to ta pierwsza składowa jest dużo ważniejsza, ponieważ ta w poprzek cięciwy wywołuje (względnie) równomierne obciążenie dolnego i górnego pokrycia. Pokrycie jest tak projektowane, by nawet przy największym obciążeniu nie wyboczyło się w wyraźny sposób, zostawiając trwałe załamania na powierzchni. Jeśli by w uproszczeniu przyjąć, że siła wzdłuż cięciwy jest równa oporowi aerodynamicznemu, to przy szybkości 270 km/h ta siła, proporcjonalna do kwadratu prędkości, byłaby tylko

ułamkiem maksymalnej siły oporu, jakiego skrzydło może doznać.

Jeśli prędkość maksymalna samolotu wynosi 900 km/h, to mówimy tutaj tylko o 9% maksymalnego oporu. Oczywiście, jest to duże uproszczenie, ponieważ relacja między siłą nośną i oporem zmienia się w czasie lotu. W rezultacie obliczony procent może być trochę wyższy.

Jeżeli wziąć pod uwagę, że przy maksymalnej prędkości opór powietrza jest o wiele za mały, by ściąć skrzydło, to stwierdzenie to jest o wiele bardziej prawdziwe dla prędkości lądowania. Gdyby tę siłę wziąć pod uwagę, redukcja wytrzymałości względnej skrzydła obliczonej w **Dodatk A** wynosiłaby pewnie kilka procent.

DODATEK C

Odległość pokonana przez obiekt spadający z samolotu

Wyobraźmy sobie samolot lecący lotem poziomym z prędkością v_0 . Odrzuca się od niego przedmiot, który kontynuuje lot samodzielny. W chwili (łagodnego) oderwania samolot jest na wysokości H . Jednym z prostych sposobów na obliczenie odległości przebytej przez ten przedmiot od punktu oderwania jest założenie braku oporu powietrza, czyli upadek swobodny.

Wtedy czas potrzebny na upadek z wysokości H wynosi:

$$t = \sqrt{2Hg}$$

a przebyta odległość w tym czasie jest $d = v_0 t$.

To rozumowanie daje dobre przybliżenie dla ciał o gęstej strukturze i zwartej budowie, takich jak na przykład prawie okrągłe kamienie. Dla lżejszych, bardziej rozłożystych obiektów, czas upadku będzie trochę dłuższy, a zasięg znacznie krótszy.

Przykład: jeśli samolot leci na wysokości $H = 30$ m z prędkością poziomą $v_0 = 270$ km/h, czyli 75 m/s, obiekt zwarty potrzebuje $t = 2,47$ s do upadku na ziemię. W tym czasie powinien pokonać $d = 185$ m w kierunku poziomym.

Inne kryterium zasięgu można wywnioskować z tzw. doskonałości aerodynamicznej. Na przykład dla samolotu Boeing 747 ta doskonałość wynosi ponad 17. Znaczący to, że gdyby wyłączyć silniki samolotu na wysokości 100 m, to samolot pokonałby jeszcze ponad 1700 m. Oczywiście realność takiego posunięcia to zupełnie inna sprawa. Poza

tym nie dotyczy to samolotu, który ma skrzydło gotowe do lądowania. Mimo to doskonałość daje pojęcie, ile może skrzydło ulecieć, gdy jest prowadzone przez resztę samolotu. Jeśli mamy na myśli oderwany segment skrzydła, który ma tendencję do ruchu bezładnego, wtedy pokonana odległość będzie tylko ułamkiem tego, co wskazuje doskonałość aerodynamiczna. W pewnym stopniu ilustruje to współczynnik oporu, który dla cienkiej płyty lecącej krawędzią w przód, może być rzędu 0,1, podczas kiedy dla płyty posuwającej się powierzchnią w przód – dochodzi do 2,0.

Autor przypuszcza, że dla obiektów lekkich, jak np. oderwany segment skrzydła, typowy przebyty dystans będzie rzędu $5H$ do $6H$, gdzie H jest wysokością, na której nastąpiło oderwanie. Ponieważ jednak lot jest bezładny a wynik ma charakter losowy, więc mogą wystąpić duże odchylenia od powyższej oceny.

Aby obraz jeszcze bardziej skomplikować, trzeba wymienić dwie prędkości obrotowe, które mają miejsce. Jedną z nich to obrót fragmentu końcowego wokół osi pionowej, co spowodowane jest nie tylko zniknięciem sił mocujących ten fragment do reszty skrzydła, ale także siłami ścinającymi, działającymi od zewnątrz. Drugi to obrót wokół osi poziomej, spowodowany momentem aerodynamicznym. Wszystko wskazuje na szybkie przejście końcówki skrzydła do lotu bezładnego.

DODATEK D

Wpływ odcięcia segmentu skrzydła na dalszy lot tego segmentu

Mówimy o segmencie lewego skrzydła długości ok. 6 m mierzonej wzdłuż skrzydła, o segmencie, który został odnaleziony w dobrym stanie. Wygląda na to, że wydarzenie powodujące zniszczenie skrzydła i oddzielenie się tego segmentu mogło nastąpić koło punktu K (czyli TAWS #38), wg [3]. Powstało więc pytanie, jak mógł nastąpić „powrót” segmentu w ten sposób, że upadł on na ziemię niedaleko punktu K zamiast dużo dalej w przód, zgodnie z kierunkiem lotu.

Możliwe wyjaśnienie tego zjawiska zaprezentowane zostało w opracowaniu [3]. Uderzenie powodujące odcięcie skrzydła było przeciwne do kierunku lotu, popchnęło więc skrzydło wstecz. Wyjaśnienie to było czysto jakościowe, bez oszacowania liczbowego. Poniżej przedstawiono obliczenie, które szacuje wpływ uderzenia odcinającego, działającego w przybliżeniu w płaszczyźnie skrzydła. Należy dodać, że w tym wypadku traktujemy segment jako obiekt o wymiarach zdefiniowanych zgodnie z wymiarami w miejscu wypadku (daje to inną, mniejszą wytrzymałość na ścinanie niż w **Dodatku A**). Poza tym odcięcie dyskutowane tutaj jest spowodowane bliżej niesprecyzowanym mechanizmem, niekoniecznie kolizją z przeszkodą.

- Długość cięciwy segmentu mierzona wzdłuż kierunku lotu pomiędzy frontowym, a tylnym dźwigarem wynosi 1,5 m.
- Grubość pokrycia górnego i dolnego: 1,5 mm (szkic poniżej).
- Przybliżone pole przekroju poprzecznego na ścinanie:
 $A_4 = 2 \times 1,5 \times 1500 = 4500 \text{ mm}^2$.
- Wytrzymałość na ścinanie użytego duraluminium: 256,2 MPa.
- Wytrzymałość przekroju na ścinanie: $P_4 = 4500 \times 256,2 = 1,153 \text{ MN}$.
- Długotrwałość uderzenia można oszacować jako czas przejścia samolotu przez odcinek długości 1,5 m:
 $t_0 = s/v_0 = 1500/75 = 20 \text{ ms}$.

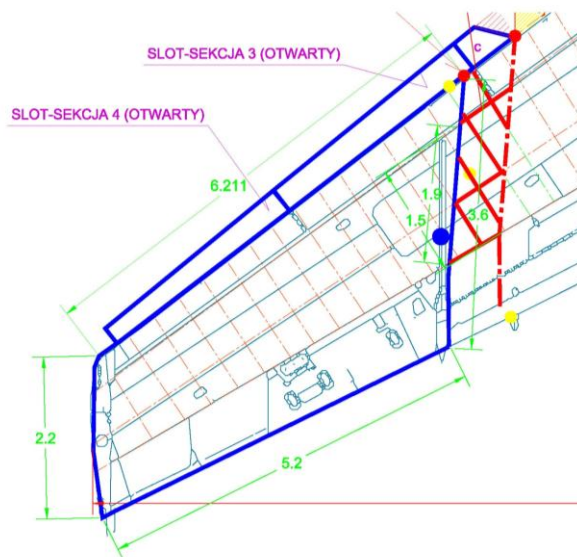
W tym czasie siła będzie rosła od zera do maksimum i znów spadnie do zera. Jedną z podstawowych krzywych opisujących takie zjawisko jest parabola kwadratowa (wypukła), dla której średnia wartość jest równa 2/3 maksimum.

Wtedy impuls udzielony segmentowi jest równy:

$$I = 20 (2 \times 1.153/3) = 15.37 \text{ MN}\cdot\text{ms} = 15,370 \text{ N}\cdot\text{s} = 15,370 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

- Masa segmentu jest oceniana przez autora na nie więcej niż 250 kg.
- W statecznym locie pęd wynosi:
 $Mv_0 = 250 \times 75 = 18,750 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$
- Wypadkowy pęd po uderzeniu:
 $Mv_0 - I = 18,750 - 15,370 = 3380 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$
- Prędkość postępową po uderzeniu:
 $v_1 = 3380/250 = 13.52 \text{ m/s}$

Prędkość więc zmaleje do 18% prędkości początkowej, która wynosiła 75 m/s. Końcówka nie będzie w stanie zupełnie „wrócić”, jedynie bardzo zmaleje przebyta przez nią odległość w porównaniu z lotem swobodnym. Wygląda więc na to, że owo odłączenie końcówki od reszty musiało nastąpić przed punktem K. Jak daleko, to zależy m.in. od rzeczywistej wysokości, na której znajdował się samolot w chwili rozłączenia.



Rys. 5. Widok znalezionej końcówki skrzydła w rzucie płaskim, zgodnie z ustaleniami mgra arch. M. Dąbrowskiego.

Literatura cytowana

- [1] Interstate Aviation Committee (IAIC). Air accident investigation Commission Final Report. *Accident of airplane of Tu-154M, Smolensk "Severny" Airdrome*, 10.4.2010.
- [2] Komisja Badania Wypadków Lotniczych Lotnictwa Państwowego, Warszawa. *Raport Końcowy z badania zdarzenia lotniczego nr 192/2010/11 samolotu Tu-154M nr 101 zaistniałego dnia 10 kwietnia 2010 r. w rejonie lotniska SMOLENSK PÓLNOČNY*, Warszawa 2011.
- [3] G. Szuladziński, Niektóre aspekty techniczno-konstrukcyjne smoleńskiej katastrofy. Raport No. 456, Wyd. 6, maj 2012, Analytical Service Pty Ltd.