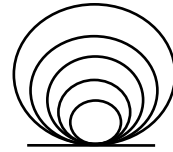


10 Coolawin Rd, Northbridge 2063, Australia
Tel. (061) (2) 9967-0998
E-mail: ggg@bigpond.net.au
ANALYTICAL SERVICE Pty Ltd



Raport No. 458

**PODSUMOWANIE HIPOTETYCZNEJ ROLI BRZOZY
W SMOLEŃSKIEJ KATASTROFIE r.2010**

Autor: Dr inż. Gregory Szuladzinski

Niezależny Doradca Techniczny
Zespołu Parlamentarnego Ds. Zbadania Przyczyn Katastrofy TU-154 M z 10 kwietnia 2010 r.

© Analytical Service Pty Ltd

Wydanie 8
Luty 2014

SUMMARY: This report considers a possibility of the wing-birch collision. It is shown that the wing is much stronger, which makes little doubt about an outcome of such an event. However, with the possibility of the wing being seriously damaged prior to collision, the loss of the wing tip can't be excluded.

WSTEP

Ponizsze sprawozdanie powinno byc widziane jako kontynuacja Raportu 456, [3], a takze jako przyczynek do niektórych aspektow katastrofy. Chociaz tematy poruszane tutaj nie zawsze sa istotne do wyjasnienia przebiegu wypadku, pomagaja jednak zamknac niektore „ślepe uliczki” poprzez podanie liczb, podczas kiedy przedtem tylko argumenty jakosciowe mialy miejsce.

Praca nad tym raportem zaczela sie przed polowa roku 2012, tak wiec ponizszy tekst przedstawia, do pewnego stopnia, ewolucje myslenia o niektórych aspektach.

Czesto wymieniana zmienna jest odleglosc, ktora moze przebyc w powietrzu przedmiot odpadajacy z samolotu. Ponizej podane sa odnosniki do prostych kryteriow, ktore nie daja wprawdzie odpowiedzi, ale wskazuja na granice, w jakich ta odpowiedz powinna sie miescic.

Jednym z obiektow niekonczacych sie sporow jest rola drzewa zilustrowanego na ponizszym zdjeciu. W poczatkowej fazie dochodzenia wysunieto hipoteza, ze ta scieta brzoza byla za bezposrednia przyczyna katastrofy. (Raporty [1], [2].) Przypuszczano mianowicie, ze uderzenie skrzydla w brzoze spowodowalo utrate znacznej czesci skrzydla i razem z tym statecznosci lotu, co spowodowalo rozbicie sie o ziemie.



Wiele badan trajektorii lotu wykonanych w miedzyczasie wykazuje, ze do kontaktu miedzy samolotem a ową brzozą moglo nie dojść. Jednak kwestie związane z pilotażem i nawigacją są

poza obszarem zainteresowania autora raportu, i jako takie nie podlegają rozwinięciu (lub ocenie) w niniejszym dokumencie. W związku z tym uderzenie skrzydła w brzoze traktowane jest jak wydarzenie, które mogło mieć miejsce i jego możliwy przebieg jest analizowany poniżej.

Nadmienić trzeba, że w poprzednim raporcie na temat wypadku [3] sposób zniszczenia skrzydła był interpretowany jako wynik wybuchu i że prawdopodobnie wydało się że skoncentrowany materiał stały był jego przyczyną. Były trudności z umiejscowieniem tego wybuchu i wstępnie założono, że miał on miejsce w punkcie K (TAWS38).

Od czasu, gdy tamten Raport się pojawił, nagromadziło się dużo wiedzy pomagającej o wiele lepiej zlokalizować wydarzenia. Wydaje się obecnie, zgodnie z Raportem 490, że na skrzydle były dwa wyraźne wybuchy, jeden ok. 40m przed brzoza, drugi ok. 70 m przed punktem K.

Pożyteczne jest, by przypomnieć Rys.11 z [3], który dobrze ilustruje skalę zniszczenia lewego skrzydła. Koncówka, która się znalazła w całości, jest tylko mała część (ok. 1/3) długości. Natomiast dalsza część skrzydła, stanowiąca ponad 1/3 jego długości, jest gruntownie zniszczona w sposób dla którego zderzenie z ziemią było zupełnie niewystarczające. Większość publikowanych dyskusji dotyczy tylko końcówki, podczas kiedy nawet nie jest pewne, jaki mechanizm spowodował jej oderwanie od reszty skrzydła.

Wykonano wiele obliczeń i wszystkie one wskazywały że skrzydło jest dużo mocniejsze od brzozy, jeśli chodzi o wytrzymałość na ścinanie. Przyjęcie że skrzydło zostało ucięte stawia więc czytelnika wobec sprzeczności. Możliwe wyjaśnienie tego paradoksu jest oferowane poniżej.

W tym raporcie jest też podjęta próba pewnego niezależnego wątku myślenia: Mianowicie czy można skojarzyć uderzenie drzewa z następującym po nim wybuchem paliwa, zwłaszcza w związku z drugim, wyraźnym wybuchem na skrzydle.

JAK DALEKO MOGLA ULECIEC KONCOWKA LEWEGO SKRZYDŁA?

W Raporcie [3] jest pokazane położenie brzozy oraz położenie końcowego odcinka zniszczonego skrzydła, po jego wylądowaniu. Odległość między tymi dwoma obiektami jest 111m. Zwążywszy że punkt kolizji był na wysokości ok $H = 6m$ (wysokość pozostałego pnia brzozy) zastanówmy się, jak daleko mogli ten segment polecieć.

Raport [4] podaje proste metody oceny zasięgu upadających fragmentów. Założenie lotu balistycznego (jak kamień o zwartej budowie) i początkowej wysokości 6m daje zasięg 87.2m. (Prędkość pozioma 75 m/s, prędkość wznoszenia 5 m/s.) Należy przy tym pamiętać, że końcówka miała tendencję do obrotu wokół trzech osi, co potęguje skłonność do szybkiego przejścia końcówki do lotu bezładnego. Tak bardzo nieregularny charakter lotu powinien spowodować znaczną redukcję zasięgu. Wynik: Niewielka odległość pokonana i raczej nieprzewidziane miejsce upadku.

Osobisty pogląd autora jest taki, że końcówka nie była w stanie ulecieć dalej niż $6H$, co daje nam tylko 36m. Oczywiście, pionowa składowa prędkości (5m/s) wydłuża nieco trajektorie, ale wówczas 50 m wydaje się być maksymalnym zasięgiem. Z drugiej strony, gdyby ten element

zachowywał swe położenie względem gruntu przez dłuższą chwilę po odcięciu, siła nosna spowodowała by dalszy zasięg, niż w/wym 87.2m.

DOTYCHCZASOWE BADANIE KOLIZJI MIĘDZY SKRZYDŁEM I BRZOZĄ

Wstępne, statyczne oszacowanie wytrzymałości obydwu obiektów jest pokazane w tej pracy.

Miało miejsce wiele symulacji wykonanych przez prof. Biniende i jego pracowników przy pomocy programu LS Dyna. Referat [5] przedstawia najbardziej kompletny opis tej pracy. Wszystkie kombinacje grubości elementów skrzydła wykazały że brzoza zostaje ścięta przez skrzydło, a nie na odwrot.

Symulacje komputerowe skrzydła uderzającego w słup stalowy są pokazane w [6] i [7]. Użycie metalu a nie drewna ma te zalety że pozwala uniknąć pewnych komplikacji związanych z własnościami drewna. Komplikacje te nie mają wielkiego wpływu na wyniki obliczeń, ale powodują niekonczące się dyskusje między czytelnikami.

W tych ostatnich pracach słup zawsze jest tak modelowany, aby mieć tę samą masę na jednostkę długości jaka ma brzoza. Wytrzymałość słupa jest kontrolowana przez grubość ścianki słupa. Wykazano, że jak długo wytrzymałość na scinanie słupa jest taka sama (lub trochę większa) jak u brzozy to skrzydło ścina brzoze.

Wyniki powyższe zostały osiągnięte mimo to, że słup miał bardziej korzystne własności mechaniczne niż brzoza; mianowicie odkształcalność słupa była ok. 3x większa niż odkształcalność drewna brzozowego. Znaczne odkształcenie poprzedzające rozerwanie jest poważnym atutem w analizie dynamicznej.

DYNAMIKA ZDERZENIA, OPIS OGÓLNY

W Dodatku A pokazano, że przy podejściu statycznym wytrzymałość skrzydła na scinanie jest ok. 3x większa, niż wytrzymałość drzewa. W poniższym dziale 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 prosto w Południową Wieżę WTC w Nowym Jorku. Na ścianie budynku pozostał obrys samolotu. Główny element konstrukcyjny tej ściany to były kolumny stalowe, gęsto postawione jedna obok drugiej. Przekrój kolumny był kwadratowy, 356x356 mm, pusty w środku, a najcięższe ścianki miały ok. 7mm grubości.

Dlaczego tak się stało? Szybkość samolotu była oceniana 700 km/h w momencie uderzenia w Wieżę Południową. 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. Bowiem efekt uderzenia rośnie proporcjonalnie do energii kinetycznej na jednostkę powierzchni uderzonego obiektu.

Bardziej elementarne tłumaczenie dlaczego dynamika zmienia charakter uderzenia: Wyobraźmy sobie że 20tu silnych mezczyzn bierze skrzydło i pcha je krawędzią o drzewo. Jest rozsądne przypuszczać, że w pewnym momencie blacha skrzydła zacznie wyginać się w bok, czyli wybaczac. Tak można oczekiwać przy obciążeniu statycznym, ale kiedy skrzydło leci z prędkością 270 km/h, sytuacja się zmienia. Blacha “nie ma czasu” się wybaczac, tzn jej bezwładność poprzeczna zapobiega temu. Blacha wówczas tnie przeszkodę jak noż.

W sumie należy przypuszczać, że szybkość skrzydła spowodowała, że kilkakrotnie wzrosła jego wytrzymałość w porównaniu z tym, co jest powiedziane w Dodatku A. Była więc duża dysproporcja między wytrzymałością drzewa i skrzydła.

WPLYW SIL AERODYNAMICZNYCH

Należy jeszcze wspomnieć o wpływie sił aerodynamicznych, które w wypadku skrzydła mają dwie główne składowe, wzdłuż cieciny (siła oporu) i prostopadle do niej (siła nosna). Ta pierwsza może odłamać skrzydło w jego płaszczyźnie a ta druga w kierunku prostopadłym do płaszczyzny.

W normalnym locie siła oporu jest tylko ułamkiem siły nosnej. Tak więc zazwyczaj mamy sytuację gdy małe zginanie działa w płaszczyźnie skrzydła, a mocne zginanie (duży moment gnący) stara się odłamać skrzydło w kierunku prostopadłym. Ponieważ skrzydło jest o wiele słabsze w tym ostatnim kierunku, wpływ siły oporu na zginanie jest często pomijany.

Sytuacja jest oczywista gdy skrzydło jest nieuszkodzone i jego kształt odpowiada temu, co zostało zaprojektowane. Natomiast przy poważnych uszkodzeniach może się znacznie zmniejszyć wytrzymałość skrzydła w jego płaszczyźnie i spowodować, że łamanie wymuszane przez siłę oporu nie jest już pomijalne.

MOŻLIWOŚĆ WYBUCHU PALIWA SPowodowanego ZDERZENIEM

Jedną z ilustracji w Raportcie [3] pokazuje że po upadku na ziemię ok 70% długości 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, to był tylko dodatek do wybuchu.) Powstaje więc pytanie czy zderzenie z brzoza mogło spowodować wybuch paliwa w zbiorniku na skrzydle.

Nie jest łatwo spowodować wybuch zbiornika przez mechaniczne uderzenie. Aby wywołać fale uderzeniową we wnętrzu ścianki zbiornika powinna być popchnięta z prędkością naddźwiękową. Zawartość zbiornika na skrzydle w czasie ładowania mogły być głównie

opary paliwa. Mieszanka powietrze-paliwo miała prawdopodobnie predkosć dzwieku niewiele różniaca 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 wynikała 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 mogła by 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 brzoza byłoby dla naziemnego obserwatora jednocześnie z wybuchem.

W tym wypadku silny puls ciśnienia wewnętrznego spowodowałby powstanie dużej siły poosiowej względem skrzydła, co by mogło skłonić końcowy segment do lotu w lewo od trajektorii. Jednak nic takiego nie miało miejsca.

Jeśli założymy, że końcówka skrzydła została odcięta przez brzoze, co było bardzo mocnym uderzeniem, to nie tylko obrot wokół osi podłużnej *ale także* skret w lewo powinny 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 spowodowało wybuch, to lokalizacja ostatniego segmentu skrzydła a także następująca po tym zmiana kierunku nie są niezgodne z takim scenariuszem.

W sumie, natychmiastowy wybuch paliwa na skrzydle wynikający z uderzenia w brzoze jest niezgodny z innymi okolicznościami. Natomiast zapłonu zbiornika z pewnym opóźnieniem nie można wykluczyć.

WPLYW WSTEPNEGO USZKODZENIA SKRZYDŁA

Ta hipoteza wydaje się być konieczna. To jest nie tylko sposób wytłumaczenia w jak słabsza brzoza mogła ścinać mocniejsze skrzydło. To także tłumaczy w pewnym stopniu, dlaczego złom drzewa wygląda tak a nie inaczej. Jeśli bowiem skrzydło doznało poważnych uszkodzeń i wynikającego stąd osłabienia, to zmienił się charakter kolizji. Siła zderzenia znacznie się zmniejszyła co działało w podobny sposób jak zmniejszenie szybkości lotu. W związku z tym zamiast czystego prawie scinania można oczekiwać scinania ze zginaniem. I na to właśnie wskazuje przełom pnia brzozy.

Symulacje [6] i [7] wyraźnie pokazują, że powinno być podwójne scinanie, w wyniku którego krótki segment pnia jest "schwytyany" przez skrzydło i zakleszcza się między górnym i dolnym pokryciem. Niczego takiego nie ma w rzeczywistości; jest tylko jeden przełom a obydwie części pnia pasują do siebie. To jeszcze jedna wskazówka że mieliśmy do czynienia z kombinacją scinanie-zginanie.

PODSUMOWANIE I DYSKUSJA

Ten raport nie stara się rozsądzić sprawy czy uderzenie skrzydła w brzoze w rzeczywistości się zdarzyło. Tak więc uderzenie jest traktowane jakby rzeczywiście miało miejsce i jego przebieg jest analizowany z kilku punktów widzenia. Niemniej jednak trzeba pamiętać, że to co się stało z kocowka skrzydła było tylko częścią większego wydarzenia, mianowicie zniszczenia lewego skrzydła.

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

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

Przyjęcie wstępnego zniszczenia skrzydła przed uderzeniem w brzoze bardzo dobrze pasuje do wyjaśnienia sytuacji. Nie tylko tłumaczy paradoks słabszego obiektu niszczącego mocniejszy, ale też dobrze ilustruje dlaczego ściety pień wygląda tak, a nie inaczej.

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 SMOLEŃSK PÓŁNOCNY*, Warszawa 2011.

[3] G. Szuladzinski, Niektóre aspekty techniczno-konstrukcyjne smoleńskiej katastrofy. Raport No. 456, Wyd. 6, maj 2012, Analytical Service Pty Ltd.
<https://sites.google.com/site/smolenskdok/>

[4] G. Szuladzinski. Rozrzut fragmentów powstających z powodu wybuchu w skrzydle. Raport No. 480, Wyd. 2, Luty 2014, Analytical Service Pty Ltd.
<https://sites.google.com/site/smolenskdok/>

[5] Zhang, C, Binienda, WK *et al.* Application of numerical methods for crashworthiness investigation of a large aircraft wing impact with a tree. *Forestry & Natural-Resource Sciences*, Vol. 5, Issue 1, pp. 71-85, 2013

[6] Technical Note 101. <https://sites.google.com/site/smolenskdok/>

[7] Technical Note 102. <https://sites.google.com/site/smolenskdok/>

[8] G. Szuladzinski i M. Dabrowski. Zniszczenie lewego skrzydła Tu-154M. Raport 490, Marzec 2014. Analytical Service Pty Ltd. <https://sites.google.com/site/smolenskdodoc/>

[9] WOOD_STRENGTH.docx <https://sites.google.com/site/smolenskdodoc/>

[11] J. Blaszczyk. Brzoza Smolenska - aspekty wytrzymałościowe struktury skrzydła samolotu Tu-154. IKS, Warszawa 2013. <https://sites.google.com/site/smolenskdodoc/>

DODATEK A Statyczna Wytrzymałość Obydwu Obiektów

W Raporcie [3] zaobserwowano: *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, oparte na fragmentach z TN101 i TN102:

Suspect birch: $D = 400 \text{ mm}$, therefore $A_2 = 125,660 \text{ mm}^2$

(An upper value was used here, but not the absolute maximum, per reports. It would be unreasonable for these circumstances to do otherwise.)

Shear strength : $F_{su} = 5 \text{ MPa}^*$

Section strength, single shear: $P_2 = A_2 F_{su} = 125,660 \times 5 = 628.3 \text{ kN}$

Wing: (at the possible impact point at 13.4 m from the center plane)

Skin thickness: 4 mm. The length of load-carrying section along the flow: 2340 mm.

Section area $A_1 = 2 \times 4 \times 2340 = 18,720 \text{ mm}^2$

Material properties of the aluminum alloy 2024-T3 were

$F_y = 293 \text{ MPa}$, $F_u = 448 \text{ MPa}$ and $e = 16\%$

This gives shear yield strength of $F_s = 0.6 \times 293 = 176 \text{ MPa}$.

Thus, $P_1 = 18,720 \times 176 = 3295 \text{ kN}$ is the in-plane section shear strength of the wing.

Structural model properties near impact point: Main skin: 4 mm,

Longeron walls: Front: 2 mm, Center: 4 mm, Rear: 2 mm

Nose skin: 2 mm and Rib: 2 mm. The stringers are thick-wall I-beams which, in this region, have the section of 329 mm^2 . As there are 3 longerons, 6 of the stringers are used as caps in the model.

Ostatnio pojawila sie wiadomosc, ze grubosc pokrycia w krytycznym polozeniu byla tylko 2.5mm. (Jest to mozliwe, jesli konstruktorzy uzyli eliptycznego rozkladu cisnienia zamiast rownomiernego, jak w naszym modelu.) Wowczas wytrzymaosc skrzydla na scinanie spada do

$P_1 = 2059 \text{ kN}$

Nadal jednak mamy $P_1/P_2 = 3.27$, czyli skrzydło jest o wiele mocniejsze.

Dodatkowe uwagi:

Zarówno dla skrzydła jak i dla brzozy dwukrotne pole przekroju jest aktywne. Nie ma to jednak wpływu na powyższe obliczenie.

(*) Wytrzymałość materiału na scinanie, z siła działająca prostopadle do pnia, jest trudna do ustalenia. Według poszukiwan autora jest mało prawdopodobne by wielkość ta przekroczyła 5 MPa i dlatego ta liczba została użyta. (W publikowanych danych jest wielki rozrzut.) Szersza dyskusja na temat która składowa wytrzymałości należy użyć można znaleźć w [9].

Wyjaśnienia dla skrzydła: Jeśli chodzi o siły działające wzdłuż cieciwy ważne jest przede wszystkim pokrycie z podłużnicami. Te ostatnie zostały pominięte, aby ułatwić obliczenie. Dźwigary odgrywają mniejszą rolę i dlatego zostały pominięte.

Dodatkowe ciekawostki dla drewna: Jeśli chodzi o drewno konstrukcyjne (sezonowane) to n.p. normy australijskie podają szereg gatunków w zakresie wytrzymałości na zginanie od 2.8 do 34.5 MPa. Dla najsłabszego drewna z powyższych wytrzymałość na scinanie ma poniżej 13% wytrzymałości gietnej. Dla najmocniejszego tylko 7%. Przyczyną tej dysproporcji: Przy obciążaniu siła tnąca pojawiają się też naprężenia styczne rozdzielające włókna wzdłuż pnia, a drewno, jako materiał ortotropowy, jest na to bardzo słabe. Drewno brzozy uchodzi za jedno z mocniejszych w porównaniu z innymi gatunkami. Drewno rosnące (zielone) ma mniejszą wytrzymałość od sezonowanego, ale większą elastyczność.

Dynamika ścięcia:

When comparing steel with timber note that for the latter the elongation prior to rupture is, at the most, 5%. Keeping in mind the importance of ductility under fast impact conditions we can say that using much larger maximum elongation makes the object much stronger. We have increased the mass per unit length of the post to match that of the tree, but we have not degraded the elongation of the post to make it more similar to the tree. This treatment was very favorable for the survival of the tree. With the lower elongation assumed, the post material would need a much greater static shearing strength to cut off the wing.

DODATEK B

EFEKT DYNAMICZNY ODCIECIA KONCOWKI SKRZYDŁA

Mówimy o koncówce lewego skrzydła, o długości ok. 6m mierzony wzdłuż skrzydła, segment który został odnaleziony w dobrym stanie. Powiedzmy że to odcięcie zostało spowodowane przez brzoze i obliczmy impuls, jaki w tym wypadku został udzielony reszcie samolotu. Dla celu porównawczego zgodnie z Raportem 490 potrzebna jest maksymalna wartość

tego impulsu, użyjemy więc grubości pokrycia 4 mm, jak to było początkowo wzięte w Dodatku A.

Największy impuls, jakie drzewo może samolotowi udzielić powstaje wtedy, gdy drzewo zostaje ścięte. Znaczący to, że zgodnie z Dodatkiem A maksymalna siła poprzeczna jest $P_2 = 628.3 \text{ kN}$.

Długość uderzenia można oszacować jako czas przejścia samolotu przez odcinek długości kesonu, 2.34 m:

$$t_0 = s/v_0 = 2340/75 = 31.2 \text{ ms}$$

W tym czasie siła będzie rosła od zera do maksimum i znowu 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 jest równy

$$i = (2/3)628.3 \times 31.2 = 13,070 \text{ kN} \cdot \text{ms} = 13,070 \text{ N} \cdot \text{s}$$

Poza częścią nosną jest jeszcze reszta skrzydła, która też pewien opór będzie stawiać. Dodając 25% do powyższej liczby otrzymujemy maksymalną oczekiwaną wartość impulsu jako

$$i_m = 16,340 \text{ N} \cdot \text{s}$$

To jest wartość poziomego impulsu, jako że ruch jest głównie w poziomie. By ocenić składową pionową, zauważmy że kąt wznoszenia jest taki, że $\tan \alpha = 5/75 = 0.0667$. Ze względu na tarcie można te proporcje podwoić, szacując pionową składową impulsu jako

$$i_z = 16,340 \times 0.1333 = 2180 \text{ N} \cdot \text{s}.$$

DODATEK C

NIEUDANA PROBA WYKAZANIA ZE BRZOZA OBCIELA SKRZYDŁO

Na Pierwszej Konferencji Smolenskiej opublikowano pracę [11], której autor wykazał, że zderzenie z drzewem mogło wywołać zniszczenie skrzydła. Ogólne wyjaśnienie sprawy jest raczej proste: wniosek jest nieważny na skutek niewłaściwej metodologii. Zamiast użyć nieliniowej dynamiki użyto liniowej statyki.

Zacznijmy od statyki. Wzory na naprężenia są ważne do czasu, dopóki nie zacznie się lokalne plynienie materiału, na skutek przekroczenia granicy plastyczności. Im większy zasięg plynienia, tym dalej od rzeczywistości są liniowe wzory naprężeniowe, ponieważ następuje zmiana rozkładu naprężeń. Pęknięcie i rozrywanie pogłębiają jeszcze różnice między wynikami statyki liniowej i nieliniowej.

Brak rozważań dynamicznych powoduje że siły bezwładności są pominięte w obliczeniach, co jest istotnym mankamentem. Na przykład, przy szybkim zderzeniu siła kontaktowa nie musi być siłą, której doświadcza uderzony przekrój. To właśnie siła bezwładności może być różnica

miedzy tymi dwiema wielkosciami. Inny aspekt to jest pozorne wzmacnienie konstrukcji cienkosciennej z powodu krotkotrwalosci obciazenia. Jest to bardzo istotne przy wyboczeniu, ktore czesto nastepuje przy znacznie wyzszych obciazeniach niz wyboczenie statyczne.

Zachodzi wiec pytanie jak to sie moglo stac, ze autor artykulu, ktory posiada wszystkie atrybuty znawcy konstrukcji lotniczych mogl popelnic taka pomyлке w osadzie? Pochodzi to glownie od tzw. specjalizacji. Samoloty sa projektowane glownie przez metodologie statyczna. Nawet takie obciazenia jak twarde ladowanie sa traktowane przez uzycie rownowaznych obciazen statycznych. Mozna wiec byc specem od konstrukcji lotniczych, a miec tylko metne pojecie o dynamice.

Zadaniem konstruktora jest zbudowac bezpieczna konstrukcje dla okreslonych obciazen. Do tego jego warsztat jest zupełnie wystarczajacy. Natomiast analiza zniszczenia pod wpływem gwałtownych i niespodziewanych obciazen wymaga specyficznej znajomosci przedmiotu a takze innych narzedzi. Jednym z bardziej znanych narzedzi jest program dynamiki nieliniowej LS Dyna.

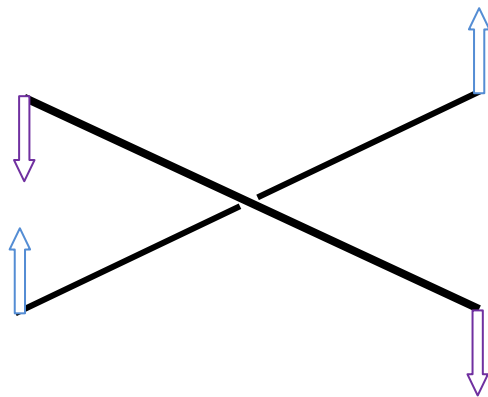
DODATEK D **ZDERZENIE DWOCH SMUKLYCH OBIEKTOW**

W Raporcie [3] bylo nastepujace stwierdzenie:

Jest tez cos wazniejszego przy takim zderzeniu. Typowa kolizja „na krzyz” dwuch smuklych obiektow konczy sie zlamaniem lub scięciem tylko jednego z nich. Jest niska szansa, by obydwa objekty zostaly zlamane. **Znaczy to, ze jeśli drzewo zostalo scięte, to skrzydło ocalalo (z powierzchniowymi uszkodzeniami) i na odwrót.** To powinno zamknac dyskusje dotyczace ewentualnej roli brzozy w tym wypadku. Jeśli nawet Raporty [1] i [2] maja rację i wbrew ostatnim badaniom byl kontakt skrzydła z brzoza, to ani zmiana kursu nie byla zauwazalna, ani skrzydło wiele nie ucierpialo, wiec rola brzozy powinna byc zupełnie usunięta z rozważan.

Powyzsze stwierdzenie moze byc dowiedzione na drodze wylaczenie statycznej, bez wnikania w komplikacje spowodowane aspektami dynamicznymi. Czytelnikom, ktorzy intuicyjnie maja watpliwosci w tej sprawie, ktorzy podejrzewaja ze obydwa objekty mogly sie w efekcie zlamac, zaleca sie wykonanie doswiadczenia, ktorego opis jest przytoczony ponizej:

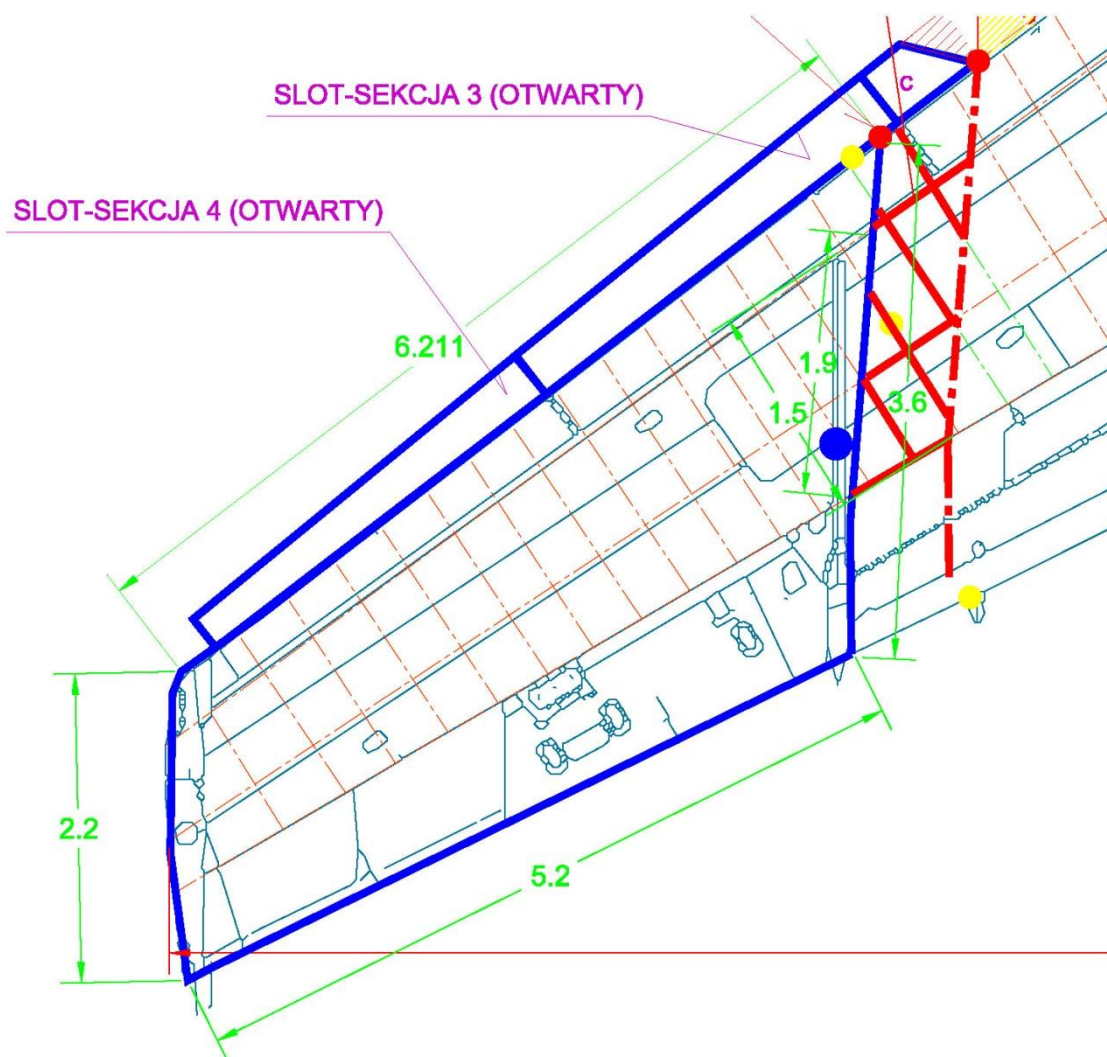
Wez zapalke miedzy palec wskazujacy i kciuk, zlekka ja sciskajac wzdluz.
To samo w drugiej rece.
Zbliz obydwie zapalki tak, by sie stykaly w polowie dlugosci
i aby miedzy nimi byl kat prosty.
Naciskaj tak, by powodowac zlamanie. Tylko jedna z nich sie lamie.
By sie upewnic, powtorz doswiadczenie 10 razy.



Dlaczego tak się dzieje? Mimo że obydwa obiekty są fabrycznie zrobione jako jednakowe, są między nimi ledwie dostrzegalne różnice, spowodowane m.in. minimalnie różnymi właściwościami materiału. Proces wzajemnego nacisku jest bardzo czuły i w chwili, gdy pierwsza zapalka 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 tego drzewa sztywną przeszkodę terenową, nie smukły obiekt.

Powyższe nie wyklucza, że obydwa obiekty mogą zostać uszkodzone w trakcie dynamicznego kontaktu, czyli zderzenia. To uszkodzenie może być przyczyną późniejszego zniszczenia z powodu sił osrodka.



Widok znalezionej koncowki skrzydla w rzucie plaskim, zgodnie z ustaleniami mgr arch M. Dabrowskiego.