

osią obrotu. Również kadłuby okazały się za mało sztywne na skręcanie, mimo dostatecznej wytrzymałości na obciążenia od usterzeń.

Drgania wymuszone od silników posiadają wysoką częstotliwość, są nieprzyjemne i powodują hałas, nie są jednak niebezpieczne, o ile naprężenia wywołane nimi nie przekraczają dopuszczalnych naprężeń na zmęczenie.

Za niebezpieczne należy uważać drgania wzbudzone — sprzężone, prowadzące przy pewnej szybkości lotu do zniszczenia konstrukcji. Są one bardzo zdradzieckie, gdyż pojawiają się nagle po przekroczeniu pewnej szybkości, nie sygnalizując przedtem specjalnej tendencji do rozdrzania się poszczególnych części. O możliwości wystąpienia drgań wzbudzonych można się przekonać, wywołując drgania wymuszone dla różnych częstotliwości i szybkości lotu i mierząc amplitudy. Ekstrapolując wykresy otrzymane z tych badań, możemy w przybliżeniu określić szybkość — przy jakiej może zajść niebezpieczeństwo drgań w locie.

Źródłem wzbudzonych drgań skrętnych skrzydła są najczęściej lotki, tak jak stery są źródłem drgań ogona.

Jest jeszcze trzeci rodzaj drgań bardzo nieprzyjemny dla załogi samolotu — chociaż nie jest on specjalnie niebezpieczny, gdyż występuje tylko przy małych szybkościach lotu i w sposób nieregularny — nie będący więc z reguły źródłem drgań wzbudzonych. Są to tzw. „trzęsienia” ogona, spowodowane uderzeniem wirów powietrza o płaszczyzny usterzeń, odrywających się od skrzydła atakującego powietrze pod dużym kątem natarcia, przy którym następuje już odrywanie się strug powietrza od nośnego profilu. Drganiom tym zaradzić można przez zmianę w opływie strug.

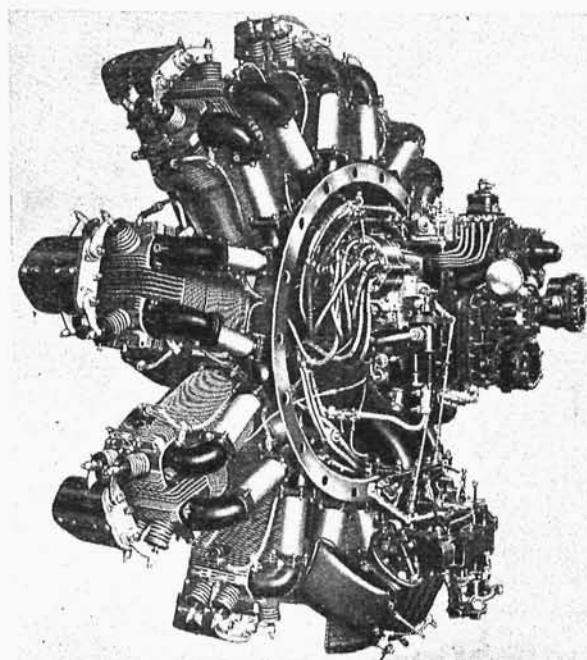
Drgania sterów niewyważonych masowo i wolno puszczone nazywają się „trzepotaniem”.

Zbyt wielka szczupłość miejsca nie pozwala nam na bliższe zapoznanie się z tym arcyciekawym i bardzo zawiłym problemem, jakim są drgania samolotów.

A są one strasznym wrogiem konstrukcji lotniczych — bo jeśli wystąpią w swej złośliwej formie (wzbudzone) — to niema dla nich wystarczająco mocnego samolotu.

Dlatego to przy budowie nowoczesnych szybkich samolotów tyle uwagi poświęca się kwestii drgań i sztywności skrzydła, kadłuba i usterzeń.

Sądzić należy, iż w przyszłości zamiast wymagań wytrzymałościowych, będą tylko wymagania sztywności, albowiem przy dalszym wzroście szybkości, a nie podnoszeniu współczynników obciążenia m — warunki wytrzymałościowe spełnione będą przez zadośćuczynienie warunkom sztywności.



Silnik Pegaz VIII, produkcji PZL

O charakterystycznych punktach i prostych wytrzymałościowych profilu lotniczego

Celem niniejszego artykułu jest zebranie i podanie niektórych dotychczasowych przybliżonych metod obliczenia kesonów lotniczych. Ścisłe obliczenie naprężeń w kesonie lotniczym jest bardzo trudne i dotychczas jeszcze nie rozwiązane ze względu na występowanie zawiłych równań różniczkowych, nie zawsze możliwych do rozwiązania. Poniżej podaję niektóre przybliżone metody obliczania kesonów lotniczych, a mianowicie te, które są dotychczas dosyć często używane. Głównym dążeniem tych metod było umo-

żliwienie zastosowania do obliczania kesonów klasycznych metod używanych dotychczas do obliczania belek pełnych. Niewątpliwie ta droga nie jest zbyt ścisłą, jeżeli chodzi o belki drażnione z przegrodami, do których należy zaliczyć kesony lotnicze i z pewnością najbliższa już przyszłość przyniesie nam rozwiązania, więcej zbliżone do rzeczywistości. Poniżej podane metody, częściej używane, są często tylko niezbyt dokładnym przybliżeniem rozwiązania ścisłego; nie od rzeczy będzie je poznać i porównać ze sobą.



I. Ogólne uwagi o wytrzymałościowym obliczaniu skrzydła z pracującym pokryciem

1. Pojęcia zasadnicze.

Uwzględnienie współpracy pokrycia ze szkieletem w skrzydłach nowoczesnych samolotów zmusiło konstruktorów do szukania nowych metod obliczania tego rodzaju zespołów celem racjonalnego uzyskania maksimum wytrzymałości przy minimum ciężaru. Zwykle zakłada się, że niecały profil skrzydła pracuje, tylko jego pewna część. Z reguły nie zalicza się do przekroju pracującego tej części profilu, która znajduje się bliżej krawędzi spływu. W skrzydle jednodźwigarowym, z pracującym kesonem przednim, bierze się pod uwagę jako element pracujący część profilu od krawędzi natarcia do tylnej ściany dźwigara. W skrzydle dwudźwigarowym, o pracującym pokryciu, za element pracujący przyjmuje się część profilu od przedniego do tylnego dźwigara; w skrzydle wielodźwigarowym przyjmuje się część od pierwszego do ostatniego dźwigara względnie od krawędzi natarcia do ostatniego dźwigara itp. Niektórzy przyjmują do obliczeń cały profil jako przekrój pracujący, co jest wtedy uzasadnione, gdy część profilu przy krawędzi spływu nie jest zajęta przez klapy, lotki itd. W ogólności zatem rozpatrujemy daną część profilu pracującą, jako belkę o zmiennych wzdłuż rozpiętości, przekrojach pracujących elementów szkieletu np. pasów dźwigarów, o zmiennej grubości pokrycia itd. itd. Belka tego rodzaju jest belką drążoną o ścianach bocznych płaskich lub tworzących pewne powierzchnie krzywoliniowe. Wewnętrzny obrys przekroju takiej belki nie musi być linią ciągłą, lecz bardzo często i przeważnie zmienia się skokami. Do tego rodzaju belek drążonych nie zawsze można stosować zwykle metody obliczeniowe, używane przy belkach pełnych, lecz często musi się szukać nowych dróg, umożliwiających rozwiązanie tego zagadnienia. Ścisłe rozwiązanie jest w tym wypadku bardzo trudne i należy się często uciec do metod przybliżonych, mniej lub więcej dokładnych.

W ogólności skrzydło skutkiem działania sił aerodynamicznych będzie zginane i skręcane. Tego rodzaju zagadnienie złożonej wytrzymałości w przypadku belek litych o używanych przekrojach nie sprawia żadnych trudności. Ten wypadek ma miejsce, gdy linie działania sił obciążających nie przecinają osi belki. Wiadomo dalej, że jeżeli siły zewnętrzne sprowadzają się do pary sił, leżących w jednej z głównych płaszczyzn belki, to oś bezwładności przekroju, prostopadła do tej płaszczyzny, jest osią obojętną przekroju belki. Powyższa zasada jest słuszną tylko w granicach ważności prawa Hooke'a; poza tymi granicami oś obojętna wychodzi ze środka przekroju, a wielkość i kierunek jej przesunięcia zależą od postaci przekroju i od wydłużeń materiału. Jeżeli zatem linia działania siły nie przecina osi belki, to występuje równocześnie zja-

wisko zginania belki tą siłą i skręcania momentem, równym iloczynowi z tej siły i odległości środka ciężkości od kierunku tej siły. Znalazłszy następnie naprężenie zginające i skręcające, możemy obliczyć na podstawie przyjętej, zależnie od umowy, hipotezy wytrzymałościowej, naprężenie wypadkowe.

Rozwiązanie powyższego zagadnienia nie jest zbyt skomplikowane w wypadku belek litych i drążonych o prostych przekrojach (kołowym, prostokątnym, kwadratowym itp.) — przy zastosowaniu pewnych sposobów przybliżonych. Każdy taki przekrój posiada szczególnie punkt, właśnie środek ciężkości, charakteryzujący się tym, że jeżeli przez niego przechodzi siła działająca, to nie wywołuje ona skręcania; poza tym punkt ten określa nam od razu wielkość ramienia momentu skręcającego, w wypadku, gdy siła nie przechodzi przez środek ciężkości. Tak w wypadku belek litych, jak i drążonych, belki są zwykle zrobione — przynajmniej w innych działach techniki, poza lotnictwem — z jednolitego materiału, mogącego w całym przekroju pracować równocześnie na zginanie i skręcanie. Sprawa się już znacznie komplikuje w wypadku mniej prostych przekrojów belki i wtedy trzeba się uciekać do dalszych przybliżeń, do rozmaitego rodzaju analogii itp. W wypadku skrzydła w końcu zagadnienie to staje się bardzo skomplikowane, gdyż w skrzydle lotniczym nie rzadko mają współpracować ze sobą dwa różne materiały, o różnych współczynnikach elastyczności i sprężystości postaciowej. Czasami do współpracy trzeba wciągnąć i trzeci materiał. Zagadnienie komplikuje jeszcze fakt, że spośród tych 2 materiałów jeden ma przejąć np. tylko naprężenia ścinające, a drugi rozciągające i ściskające. Np. przy obliczaniu skrzydeł o szkielecie drewnianym z pracującą sklejką pokrycia zakłada się zwykle, że skręcanie skrzydła przejąłby materiał pokrycia, a zginanie pasy dźwigarów.

Tego rodzaju podział „pracy“ skrzydła na poszczególne elementy skłania nas do odrębnego potraktowania najpierw problemu czystego skręcania, potem czystego zginania, a następnie z kolei problemu złożonej wytrzymałości skrzydła.

2. Czyste skręcanie skrzydła, środek skręcania i oś skręcania

Bierzemy pod uwagę tę część skrzydła, która ma przenieść dane obciążenie. Niech skrzydło to będzie skręcane momentem skręcającym M_{skr} . Na skutek działania tego momentu wystąpią 2 zjawiska:

a) Poszczególne sąsiednie przekroje skrzydła obróć się względem siebie o pewien kąt.

b) Obok naprężeń ścinających wystąpią naprężenia rozciągające i ściskające w poszczególnych elementach pracujących, powodujące odkształcenia osiowe czyli odkształcenia wzdłuż rozpiętości skrzydła.

Należy zaznaczyć, że niektóre sposoby obliczeń obejmują tylko pierwszy punkt tzn. obrót



i związane z tym naprężenia ścinające, pomijają natomiast odkształcenia wzdłuż rozpiętości.

Obrót przekroju pracującej części skrzydła następuje około pewnego punktu, zwanego „środkiem skreślenia profilu”. Sposoby znajdowania środków skreślenia dla skrzydeł rozmaitych konstrukcji podam poniżej. Fakt wystąpienia naprężeń osiowych skutkiem naprężeń ścinających jest prosty do wyjaśnienia. Wyobraźmy sobie keson skrzydłowy o przekroju prostokątnym. Niech w wierzchołkach tego prostokąta znajdują się pasy dźwigarów, połączone sztywnie ze ściankami kesonu. Przy skreśnianiu tego kesonu wystąpią w ściankach naprężenia i siły ścinające. Siły te w 2 sąsiadujących ściankach, zbiegających się na tym samym dźwigarze, nie muszą być równe sobie, lecz mogą być różnej wielkości. Ich różnica wywoła pewne naprężenia osiowe i odkształcenia pasa dźwigara.

Zdefiniujmy jako zjawisko czystego skreślenia belki, czy też skrzydła — fakt wystąpienia na zewnątrz, kąta obrotu sąsiednich przekrojów około środków skreślenia poszczególnych przekrojów z tym, że nie zachodzi zjawisko zginania tzn. że linia łącząca środki skreślenia poszczególnych przekrojów przed i po skreśnieniu zachowuje to samo, niezmienione położenie i tę samą postać. Z tej definicji wypływa według Föppl'a [4]¹⁾ następujące pojęcie „środka skreślenia”: środek skreślenia jest to taki punkt przekroju, który przy czystym skreśnianiu nie doznaje żadnego przesunięcia w danym przekroju.

W ogólności, gdy keson nie jest symetryczny, przekroje jego nie pozostają płaskimi przy skreśnieniu. Skutkiem sił osiowych, występujących przy skreśnieniu w niektórych elementach kesonu, bardzo często przekrój, pierwotnie płaski, ulega pewnemu zniekształceniu z powodu różnych przesunięć poszczególnych punktów tegoż przekroju (ściskanie, rozciąganie). Dla niektórych kesonów te przesunięcia punktów przekroju mogą być jednakowe na całym przekroju; w tym wypadku przekroje pierwotnie płaskie, pozostaną nadal płaskimi i nie ulegną żadnym zniekształceniom. Warunek, jaki musi być zachowany, aby tego rodzaju wypadek zaszedł przy czystym skreśnianiu, podaje Grzędzielski [2]. Rozważania Grzędzielskiego i Billewicza odnoszą się do dźwigara o stałym przekroju względnie do takiego, dla którego założenie stałego przekroju jest dostatecznym przybliżeniem. Warunek ten wygląda:

$$r = \frac{2 F}{\delta \Phi} \dots \dots \dots (1)$$

gdzie:

r = ramię elementarnego momentu skreślającego od siły ścinającej na ściance przekroju do środka skreślenia przekroju.

F = pole zawarte w obwodzie zewnętrznych ścianek kesonu,

δ = grubość ścianki w rozważanym punkcie,

¹⁾ Cyfry w graniastych nawiasach odnoszą się do spisu literatury, podanego na końcu tej pracy.

$\Phi = \sum \frac{b_i}{\delta_i}$ = suma stosunków długości poszczególnych ścianek do ich grubości.

Powyższy warunek jest spełniony np. dla kesonu o przekroju kołowym o $\delta = \text{const.}$ Wtedy środek skreślenia jest w środku koła i ramię momentu stale równa się promieniowi.

A zatem przekrój kołowy kesonu pozostaje płaskim przy czystym skreśnianiu. Grzędzielski udowadnia, że ten warunek zachodzi i dla kesonu o przekroju trójkątnym.

Wreszcie należy zaznaczyć, że położenie środka skreślenia zależy od rozmieszczenia pasów dźwigarowych, obciążonych przy skreśnianiu siłami osiowymi (normalnymi). Atoli dla kesonów o przekrojach, spełniających warunek (1), środek skreślenia jest stały, niezależny od rozmieszczenia pasów i nie zmienia swojego położenia przy przesuwaniu tychże [2]. Warunek ten zachodzi np. dla kesonu o przekroju kołowym z 3 pasami na obwodzie koła (w dowolnych zresztą punktach) i o stałej grubości ścianki, dalej dla kesonu o przekroju trójkątnym, o różnych grubościach ścianki, dalej dla kesonu o przekroju trójkątnym, o różnych grubościach ścianki i dowolnym rozmieszczeniu 3 pasów.

Linia łącząca środki skreślenia poszczególnych przekrojów nazywa się osią skreśleń lub osią sprężystości skrzydła. Ta oś jest w ogólności li-

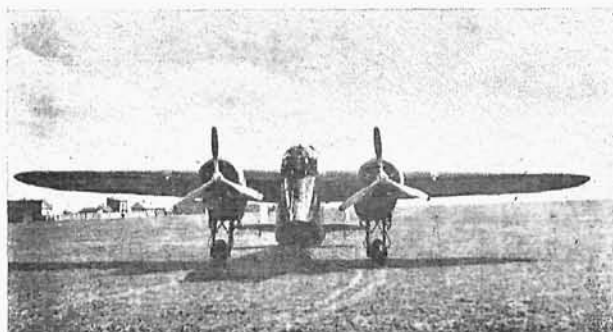


STONIL

**SAMOCHODOWE
MOTOCYKLOWE
LOTNICZE
ROWEROWE**

WSZĘDZIE DO NABYCIA!





Polski samolot bombowy LWS — 6 z podwójnym usterzeniem

nią krzywą płaską lub nawet przestrzenną, a wyjątkowo linią prostą.

Zaznaczę jeszcze, że nie wszyscy badacze zgadzają się na tego rodzaju przyjęcie środka skręcania. Np. niektórzy autorzy angielscy są przekonania, że wogóle nie ma środka skręcania w powyżej podanym znaczeniu, szczególnie właśnie dla przekrojów niepełnych. Poniżej omówię tylko te przybliżone metody obliczania kesonów, które przyjmują istnienie środka skręcania, choć nie przesądzam sprawy słuszności tego rodzaju przyjęcia, które może się okazać niezupełnie ścisłym.

3. Środek sił poprzecznych, środek sił ścinających, środek sprężystości.

Teoria zginania belki pełnej o prostym przekroju ma za podstawę tzw. zasadę Bernoulli'ego zachowania płaskich przekrojów w czasie zginania. W połączeniu z prawem Hooke'a wynika z tego przyjęcia liniowy przebieg naprężeń zginających [4]. Zwykle przy tym przyjmuje się, że płaszczyzna obciążenia przechodzi przez oś belki. Jak długo rozważa się belki o przekroju podwójnie symetrycznym tzn. posiadającym 2 do siebie prostopadłe osi symetrii, to powyższe założenia i wnioski są słuszne i potwierdzone wynikami badań. Podobnie założenia te są słuszne w wypadku obciążenia belki o przekroju z jedną osią symetrii, ale tylko wtedy, gdy płaszczyzna obciążenia pokrywa się z płaszczyzną symetrii. W wypadku takiej belki obciążonej tak, że płaszczyzna obciążenia nie pokrywa się z płaszczyzną symetrii, tudzież przy użyciu belek o przekrojach niesymetrycznych powyższe założenia zawodzą, co zresztą już potwierdziły badania Bach'a. W tego rodzaju belkach, gdy płaszczyzna obciążenia przechodzi przez środek ciężkości, obciążenia zginające nie rozkładają się prostoliniowo. Wyjaśnienie tego zjawiska podają Weber [5], Chailart [6], Föppl, Grzędzielski [2] i inni. Aby przy zginaniu belki o przekroju niesymetrycznym, naprężenia zginające rozkładały się prostoliniowo, wypadkowa wszystkich naprężeń ścinających w danym przekroju musi przejść przez pewien punkt, ściśle określony danymi wymiarami belki, zwany „środkiem sił ścinających” lub „środkiem sił poprzecznych”. Gdy płaszczyzna obciążenia przechodzi przez

inny punkt przekroju np. przez środek ciężkości, to oprócz zginania występuje skręcanie na ramieniu równym odległości środka sił poprzecznych od płaszczyzny obciążenia.

Środek sił poprzecznych w przekrojach o jednej osi symetrii leży zawsze na tej osi. Gdy dla takich przekrojów płaszczyzna obciążenia jest nachyloną pod ostrym kątem do płaszczyzny symetrii i przechodzi przez środek sił poprzecznych, to również rozkład naprężeń zginających w danym przekroju jest prostoliniowy. Odpowiednia oś obojętna przechodzi zawsze przez środek ciężkości. Dla przekrojów niesymetrycznych Föppl podaje podobne prawo: dla każdego przekroju, choćby niesymetrycznego, istnieje środek sił poprzecznych, jednoznacznie określony wymiarami konstrukcyjnymi i kształtem przekroju. Gdy krawędź przecięcia się płaszczyzny obciążenia z płaszczyzną przekroju przechodzi przez ten punkt, to rozkład obciążeń zginających w danym przekroju jest prostoliniowy. Gdy ta krawędź czyli linia obciążenia obraca się około środka sił poprzecznych, to odpowiednia oś obojętna obraca się około środka ciężkości przekroju. W dalszym ciągu Föppl udowadnia, że środek sił poprzecznych pokrywa się ze środkiem skręcania przekroju. Są to punkty identyczne. To samo twierdzenie znajdujemy u Grzędzielskiego [2]. Sposoby znajdowania tego punktu dla różnych przekrojów podam poniżej.

W literaturze np. sowieckiej można spotkać jeszcze inną nazwę na ten punkt, a mianowicie środek sprężystości lub środek sztywności. Również używaną jest nazwa: oś sztywności skrzydła.

Dr. Kirste (Francuz) używa jeszcze innej nazwy na ten punkt, a mianowicie „środek zginania” czyli punkt, przez który musi przejść siła poprzeczna, aby nie wystąpiło skręcanie, lecz tylko czyste zginanie.

4. Środek ciężkości i czyste zginanie skrzydła.

Dalszym charakterystycznym punktem profilu lotniczego, ewentualnie przekroju kesonu skrzydłowego jest jego środek ciężkości. Jeżeli chodzi o skręcanie, to środek ciężkości nie odgrywa w tym wypadku żadnej roli, chyba że środek skręcania w szczególnym układzie pokrywa się

ze środkiem ciężkości. Natomiast przy zginaniu środek ciężkości odgrywa bardzo ważną rolę. Zdefiniujmy jako czyste zginanie belki — fakt wygięcia się osi belki, pierwotnie np. poziomej, po pewnej krzywej z tym, że przekroje, pierwotnie płaskie, pozostają nadal płaskimi, tylko każdy przekrój obraca się względem sąsiedniego o pewien elementarny kąt. Jedne włókna będą rozciągane, drugie ściskane, a w środku przebiega warstwa, której włókna nie ulegają żad- po pewnej krzywej z tym, że przekroje pierwotnej długości. Dla belki litej o prostym przekroju czyste zginanie zachodzi wtedy, gdy płaszczyzna momentu zginającego przechodzi przez środek ciężkości przekroju. Wszystkie osie obojętne przechodzą również przez środek ciężkości przekroju i, jak wiadomo z twierdzenia Bresse'a i de Saint-Venant'a, kierunek płaszczyzny pary zginającej i kierunek odpowiadającej osi obojętnej są kierunkami sprzężonymi względem centralnej elipsy bezwładności przekroju. Gdy kierunek płaszczyzny momentu zginającego obraca się około środka ciężkości, to odpowiadająca oś obojętna również obraca się około tegoż środka ciężkości. A zatem środek ciężkości jest to charakterystyczny punkt przy czystym zginaniu; nie doznaje on w tym wypadku żadnego przesunięcia względem osi belki w porównaniu z położeniem poprzednim.

Jeżeli chodzi o skrzydło, to z powyżej przeprowadzonych rozumowań wynika jasno, że czyste zginanie skrzydła zachodzi tylko w tym wypadku, gdy siła poprzeczna przechodzi przez środek sił poprzecznych danego przekroju; jednakże w tym wypadku kierunek płaszczyzny pary zginającej przechodzi przez środek sił poprzecznych, a kierunek odpowiadającej osi obojętnej przez środek ciężkości i trudno tu wprost stosować twierdzenie Bresse'a i Saint-Venant'a. Związek pomiędzy tymi 2-ma prostymi jeszcze niżej omówimy.

Linia, łącząca środki ciężkości przekrojów, zwana osią skrzydła, nosi też często nazwę osi zginania skrzydła. Ta oś jest w ogólności linią krzywą, ale często też linią prostą. A zatem czyste zginanie skrzydła zajdzie tylko w tym wypadku, gdy powierzchnia, utworzona przez kierunki obciążeń wypadkowych wzdłuż rozpiętości całego skrzydła, przechodzi przez oś sprężystości. Przy obrocie tych obciążeń około środków sił poprzecznych jedynie włókna leżące na osi zginania nie zmieniają swej pierwotnej długości.

Należy jeszcze nadmienić, że warunek zachowania płaskich przekrojów przy czystym zginaniu nie zawsze jest spełniony. Mianowicie właśnie dla przekrojów niepełnych, drażonych i „rozrzuconych“ przy czystym zginaniu przekroje nie zostają płaskimi, choć przebieg naprężeń można w dostatecznych granicach ścisłości uważać za prostoliniowy i choć nie występuje skracanie. Powodem tego są naprężenia ścinające, które dla tego rodzaju przekrojów, jak przekrój kesonu lotniczego, odgrywają dużą rolę i powodują silne niekiedy zwichrzenie przekro-

jów, pierwotnie płaskich. Z tego powodu w poniżej podanych przybliżonych metodach jako warunek czystego zginania będziemy uważali warunek zachodzenia prostoliniowego rozkładu naprężeń normalnych w danym przekroju.

5. Obciążenie złożone i metoda obliczania skrzydła kesonowego

Przy obciążeniu skrzydła w locie, na podstawie powyżej podanych, przybliżonych założeń, zaśść mogą następujące przypadki:

a) Siła poprzeczna przechodzi przez środek sił poprzecznych danego profilu. Przekrój nie ulega żadnemu skręceniu i rozkład naprężeń normalnych od momentu zginającego jest prostoliniowy. Występujące naprężenia mogą pochodzić tylko od momentu zginającego w danym przekroju i od sił poprzecznych.

b) Siła poprzeczna nie przechodzi przez środek sił poprzecznych danego profilu. Przekrój ulega skręceniu i zwichrowaniu. Występujące naprężenia pochodzą od momentu zginającego, skręcającego i od sił poprzecznych.

Przybliżona zatem metoda obliczania skrzydła przedstawia się następująco:

- znalezienie środka ciężkości,
- znalezienie środka sił poprzecznych,
- znalezienie kierunku i wielkości siły wypadkowej, działającej na skrzydło,
- sprowadzenie wypadkowej do środka sił poprzecznych; otrzymujemy w ten sposób moment skręcający i jego wielkość i siłę poprzeczną,
- wyznaczenie wielkości momentu zginającego w danym przekroju,
- znalezienie osi obojętnej przekroju, przechodzącej przez środek ciężkości, dla danego kierunku płaszczyzny momentu zginającego, przechodzącego przez środek sił poprzecznych; oś obojętna wyznaczy nam każdorazowo wielkość „e“ odległości włókien skrajnych rozciąganych i ściskanych,

g) obliczenie wytrzymałościowych wielkości charakterystycznych, potrzebnych do wyznaczenia naprężeń, a więc: momentu bezwładności skręcania ewentualnie momentu oporu skręcania, momentu bezwładności przekroju itd.

h) wyznaczenie naprężeń w poszczególnych elementach pracujących od czystego zginania, czystego skręcania i od samych sił poprzecznych,

i) wyznaczenie naprężeń wypadkowych w poszczególnych elementach jako sumy algebraicznej 3 powyższych naprężeń.

Poniżej omówię punkty a) b) f) i wspomnę tylko pokrótce o punktach g) i h).

Niekiedy upraszcza się obliczanie kesonu skrzydłowego przez założenie, iż środek sił poprzecznych pokrywa się ze środkiem ciężkości. Innymi słowy, zakłada się, że keson pracuje jak belka o prostym przekroju i stosuje się w tym wypadku do obliczenia tego kesonu twierdzenie Bresse'a i de Saint-Venant'a. Czasami w niektórych kesonach, te 2 punkty leżą tak blisko siebie, że to założenie może być prawie zupełnie zgodne z rzeczywistością. Oczywiście w tym



wypadku również powyżej podany schemat obliczeniowy nie ulegnie żadnej zmianie poza punktem h); mianowicie kierunek osi obojętnej znajdziemy z centralnej elipsy bezwładności przekroju.

Drugim sposobem upraszczającym jest przyjęcie, że skręcanie odbywa się około środka sił poprzecznych, lecz przy obliczaniu naprężeń normalnych od zginania przesuwamy się siłę poprzeczną ze środka sił poprzecznych do środka ciężkości; oczywiście, popełnia się przy tym pewien błąd, lecz przez to jest umożliwione znalezienie osi obojętnej z centralnej elipsy bezwładności.

Dalsze uproszczenie polega na tym, że zamiast szukać głównych osi bezwładności, uważa się za nie prostą równoległą do cięciwy i prostopadłą do niej; oczywiście, obie te proste muszą przejść przez środek ciężkości. Zwykle kąt pomiędzy tą parą prostych, a parą głównych osi bezwładności jest mały, tak że nie popełnia się przy tych uproszczeniach dużych błędów. Billewicz [10] podaje przykład obliczeniowy kesonu wielodźwigarowego, z którego wynika, że różnica w wielkościach momentów bezwładności względem głównych osi bezwładności i osi zastępczych wynosi dla momentu względem osi poziomej około 2,7%, dla momentu względem osi pionowej około 0,25%.

Często też zamiast szukać osi obojętnej dla danego kierunku płaszczyzny pary zginającej, rozkłada się moment na 2 kierunki głównych osi bezwładności (rzeczywistych lub przyjętych w sposób uproszczony), otrzymując w ten sposób 2 momenty zginające w płaszczyznach głównych (poziomej i pionowej).

W końcu wprowadza się pewne uproszczenia w obliczeniach wielkości momentu skręcającego. Mianowicie znajduje się środek sił poprzecznych kesonu i środek parcia dla tego kąta natarcia, który jest miarodajny ze względu na największe obciążenia skrzydła. Przez środek parcia prowadzimy wypadkową, działającą na keson, i rozkładamy ją na 2 składowe: P_n i P_t tzn. prostopadłą do cięciwy i leżącą na cięciwie. Otrzymujemy zatem 2 składowe momenty skręcające:

$$M_{skr} P_p = P_n (e-s) \quad (1)$$

$$M_{skr} P_t = P_t f \quad (2)$$

gdzie:

e = odległość środka parcia od krawędzi natarcia skrzydła,

s = odległość środka sił poprzecznych od krawędzi natarcia skrzydła,

f = odległość cięciwy od środka skręcania.

Naprężenia ścinające od tych 2 momentów skręcających należy oczywiście do siebie algebraicznie dodać.

6. Metoda Prof. Dr. Kirste'a

Prof. dr inż. Leon Kirste podał na łamach „L'Aéronautique” metodę obliczania kesonów skrzydłowych, która jest niekiedy używana, ale która równocześnie nasuwa pewne wątpliwości. Dr. Kirste wprowadza najpierw pojęcie środka

skręcania tzn. punktu, około którego następuje obrót przekroju przy działaniu samego momentu skręcającego. Oczywiście skutkiem skręcania przekroje, pierwotnie płaskie, mogą ulec deformacji. Następnie Kirste wprowadza pojęcie czystego zginania tzn. takiego wytwężenia danego elementu, przy którym przekroje nie obracają się i pozostają płaskimi. Z drugiego warunku Kirste wyprowadza następujące twierdzenie: aby siły ścinające nie wywołały deformacji danego przekroju, trzeba, by ich wypadkowa przeszła przez pewien punkt, którego położenie zależy tylko od danych konstrukcyjnych kesonu w tym przekroju, a zwanym środkiem zginania. Z drugiej strony obrót danego przekroju niema miejsca, gdy wypadkowa przechodzi przez środek skręcania. W wypadku więc czystego zginania wypadkowa powinna przejść przez 2 różne punkty danego przekroju: środek zginania i środek skręcania. Następnie Kirste podaje sposoby znalezienia tych 2 różnych punktów charakterystycznych.

Jak widać, rozumowania prof. Kirste'a nie zgadzają się z powyżej przytoczonymi rozumowaniami Föppl'a, Weber'a, Grzędzińskiego, Billewicza i innych, według których te dwa punkty są identyczne i wystarczy taki punkt znaleźć na podstawie jednego tylko określenia: jako środek skręcania lub jako środek sił ścinających.

Z rozważań prof. Kirste'a wynikałoby, że w danym kesonie mamy tylko jeden możliwy kierunek płaszczyzny momentu pary zginającej, aby wystąpiło czyste zginanie: jest nim prosta, łącząca środek zginania i środek skręcania. Otóż to twierdzenie prof. Kirste'a jest znowu w sprzeczności z twierdzeniem Föppl'a (Drang und Zwang, 1928, str. 126.11), że dla każdej belki o jakimkolwiek przekroju istnieje nieskończenie wiele kierunków płaszczyzn momentów pary zginającej, dla których rozkład naprężeń normalnych przy zginaniu jest prostoliniowy. Rozważania prof. Kirste'a prowadzą niekiedy do sprzecznych z sobą wyników. Przyjmijmy np. taki przypadek obciążenia, w którym siła poprzeczna przechodzi tylko przez środek skręcania, a nie przechodzi przez środek zginania. Nie zajdzie wtenczas skręcanie, lecz zginanie z deformacją przekrojów płaskich i klasyczne wzory na naprężenia mogą mieć zastosowanie, gdy deformacja przekrojów jest wywołana przez siły ścinające. Atoli gdy siła poprzeczna przechodzi tylko przez środek zginania, to sprowadzimy ją do środka skręcania; otrzymamy moment skręcający i znowu zginanie z deformacją przekrojów, choć z warunku wyjściowego wynikałoby, że deformacja przekrojów nie może zajść.

II. Sposoby wyznaczania punktów i prostych charakterystycznych profilu

1. Środek ciężkości

Środek ciężkości pół przekroju kesonu skrzydłowego wyznacza się w odniesieniu do 2 osi układu współrzędnych, z których zwykle jedną

jest cięciwa, a drugą do niej prostopadłą. Początek układu współrzędnych obrać można w dowolnym punkcie cięciwy. Ponieważ środek ciężkości jest punktem charakterystycznym dla zginania, więc do wyznaczenia położenia środka ciężkości należy przyjąć powierzchnie przekrojów tylko tych elementów, które — według założenia — mają pracować na zginanie. Jednakże należy tu rozróżnić 2 wypadki;

a) wszystkie elementy, pracujące na zginanie, pracują w przybliżeniu jednakowo tzn. że rozkład naprężeń normalnych dla każdego elementu przekroju jest prawie jednakowy. Ten przypadek zachodzi, gdy bierzemy pod uwagę tylko pasy dźwigarów np. w skrzydle wielodźwigarowym, a nie bierzemy pod uwagę (dla zginania tylko) pokrycia, normalnych omegówek, zetówek, cienkich listew, służących do przytrzymania sklejek pokrycia w kesonach drewnianych itp. Dalej wszystkie elementy pracujące muszą być wykonane z tego samego materiału tzn. posiadać ten sam moduł elastyczności. W tym wypadku do wyznaczenia położenia środka ciężkości pół można przyjąć rzeczywiste powierzchnie przekrojów poszczególnych elementów pracujących;

b) poszczególne elementy, pracujące na zginanie, pracują niejednakowo, tzn. że rozkład naprężeń normalnych dla poszczególnych elementów jest różny. Ten przypadek zachodzi, gdy bierzemy pod uwagę przy zginaniu pasy dźwigarów, omegówki, zetówki, listwy podłużne, pokrycie itp. Tu należy zaliczyć przypadek współ-

pracy ze sobą materiałów o różnych modułach elastyczności (jak np. dźwigary o pasach sosnowych i pokrycie ze sklejek). Należy wtedy albo uwzględnić przy obliczaniu kesonu „wędrówkę” środka ciężkości i osi obojętnej, albo przyjąć do wyznaczenia położenia środka ciężkości z góry pewne „obliczeniowe” powierzchnie przekroju poszczególnych elementów pracujących, różne od rzeczywistych. Zajmiemy się bliżej tym przypadkiem.

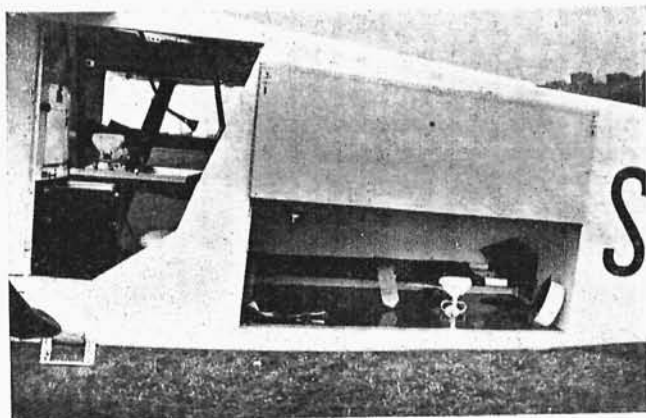
Otóż wiadomo, że w zginanym kesonie środek ciężkości nie jest punktem stałym. Zwykle stosowany sposób wyznaczania środka ciężkości zachowuje tak długo z dużym przybliżeniem swoją wartość, jak długo mamy do czynienia ze stateczną postacią równowagi danego kesonu. Atoli przy pewnych naprężeniach ściskających „krytycznych” może wystąpić po stronie ściskanej lokalne wyboczenie powłoki kesonowej. Pod słowem „ściskające naprężenia krytyczne” rozumiemy te naprężenia, pod wpływem których w strefie ściskanej występuje utrata stateczności, czyli praktycznie: część strefy ściskanej przestaje pracować częściowo lub całkowicie. Naogół należy rozróżnić dwie możliwości: a) naprężenia krytyczne pokrycia (blachy lub sklejek), po przekroczeniu których pokrycie ulega sfałdowaniu, ale strefa ściskana jeszcze pracuje; b) naprężenia krytyczne usztywniaczy (omegówek, zetówek, listew podłużnych itp.), po przekroczeniu których omegówki ulegają całkowitemu wyboczeniu i praktycznie strefa ściskana ulega zniszczeniu. Najpierw więc przestaje pracować ta część, w której wystąpią największe naprężenia ściskające tzn. elementy najbardziej oddalone od osi obojętnej. Wskutek tego w danym przekroju mniej elementów bierze udział w pracy czyli oś obojętna przesuwana się. Ponieważ zakłada się, że oś obojętna przechodzi przez środek ciężkości danego przekroju, więc z tego wynika, że i środek ciężkości również się przesuwa. Widać więc, że właściwie w kesonie, pracującym na zginanie, należałoby uwzględnić 2 środki ciężkości: jeden geometryczny, rzeczywisty środek ciężkości, którego położenie zależy tylko od pół przekrojów elementów pracujących; drugi „obliczeniowy” środek ciężkości, różny od poprzedniego, dlatego, że ten sam element w stosowanych konstrukcjach kesonowych inaczej pracuje na rozciąganie, a inaczej na ściskanie. Położenie tego „obliczeniowego” środka ciężkości zmienia się w czasie wzrostu obciążenia i zależy w znacznym stopniu od rozłożenia w przekroju elementów, pracujących na ściskanie.

Przesuwanie się osi obojętnej jest zjawiskiem znanym w teorii [12] i dla przekrojów prostych podano już wzory na wskaźnik oporu gięcia poza granicami ważności prawa Hooke’a (tzw. gięcie elastoplastyczne) jak również wielkości przesunięcia osi obojętnej, atoli bez uwzględnienia niestateczności przekroju tzn. lokalnego wyboczenia. Dla kesonów lotniczych jednakże brak jest dotychczas ścisłego rozwiązania i dlatego używa się rozmaitych sposobów przybliżonych.

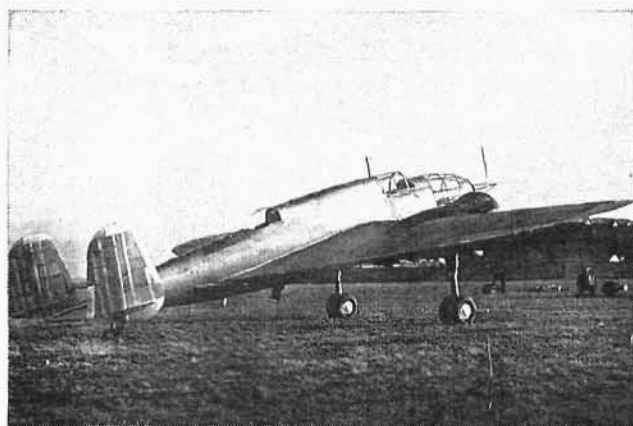
Weźmy pod uwagę keson, pracujący na zgi-



Samolot sanitarny LWS — 2



Samolot sanitarny LWS — 2; dolne stanowisko noszy



Najnowszy polski bombowiec PZL — 37

nanie przy pewnym rozkładzie momentów zginających wzdłuż rozpiętości skrzydła. Jednakże nie liczymy od razu na momenty zginające niszczące, lecz „obliczeniowo” stopniowo obciążamy keson momentami zginającymi tzn. dzielimy zakres od zera do „n” niszczącego na pewną ilość części, które będziemy nazywali przez „n₁”, „n₂” itd. aż do „n” niszczącego. Znajdziemy geometryczny środek ciężkości przekroju i obciążamy momentami zginającymi n₁, n₂..., obliczając przy tym największe naprężenia rozciągające i ściskające. Przy pewnym „n₁” naprężenia ściskające w pokryciu przekroczą naprężenia krytyczne i część strefy ściskanego pokrycia na pewnym łuku o kącie środkowym „α” ulegnie sfaldowaniu i praktycznie przestaje pracować w 100%. Trudno dokładnie określić, od czego to zależy. W skrzydle względnie w kesonie, nawet w granicach sprężystych odkształceń, naprężenia lokalizują się w bardziej sztywnych elementach. Ta różnorodność rozkładu naprężeń jest spowodowana różną wielkością odkształceń wskutek miejscowych wyboczeń, mniej sztywnych części pokrycia i usztywnień wzdłużnych. Zatem od pierwszej chwili pracy do momentu złamania nie każdy element przenosi takie naprężenie, jakie mógłby przenieść ze względu na swój przekrój. Zachodzi to dlatego, że nie wszystkie pracujące elementy udaje się rozłożyć w przekroju tak, aby powstające w nich naprężenia odpowiadały ich zdolnościom pracy, dalej z powodu nieznajomości dokładnego prawa rozkładu naprężeń w przekroju itp. Ażeby ten fakt niejednostajności pracy poszczególnych elementów ująć liczbowo, wprowadza się pewien współczynnik redukujący, przez który trzeba mnożyć powierzchnie przekrojów i naprężenia elementów mniej sztywnych. Otrzymujemy w ten sposób pewne powierzchnie „obliczeniowe”. Wielkości tych współczynników, (podawane np. przez autorów sowieckich na podstawie doświadczeń), zależą od tego, czy obciążenie zawiera się w granicach sprężystości materiału, czy też jest obciążeniem łamiącym. Zwykle liczy się na obciążenia łamiące. Poniżej podaję wielkość tego współczynnika redukującego „K” dla skrzydła duralowego,

dwudźwigarowego z pracującym pokryciem na omegówkach według [8].

Pracujący element	Wielkość współczynnika K	
	na ściskanie	na rozciąganie
Pasy dźwigarów	1,0	1,0
Podłużne omegówki między dźwigarami lub w przodzie skrzydła	0,5	0,75
Podłużne omegówki w tylnej części skrzydła z powodu tego, że tylna część skrzydła pracuje wogóle słabo i jest przecięta klapą i lotką	0,0	0,0
Pokrycie od przodu do tylnego dźwigara	K	0,75

Wielkość K dla pokrycia na powierzchni ściskanej wyznacza się w sposób następujący:

Pokrycie na ściskanie pracuje tylko w sąsiedztwie usztywnień wzdłużnych. Nazwijmy przez „c” odległość 2 rzędów nitów od siebie, przytwierdzających pokrycie do omegówki, to na ściskanie pracuje szerokość pokrycia równa:

$$b = b_0 + c (3)$$

Dodatkową szerokość „b₀” polecają obliczać z wzoru Karman’a, który Lundkwist [11] przedstawia w postaci:

$$b_0 = 1,7 \delta \sqrt{\frac{E}{\sigma_{pl}}} (4)$$

gdzie:

δ = grubość pokrycia,
E = moduł elastyczności,
σ_{pl} = granica plastyczności tworzywa.

Dla duralu:

$$\begin{aligned} E &= 700\,000 \text{ kG/cm}^2 \\ \sigma_{pl} &= 2\,700 - 2\,888 \text{ kG/cm}^2 \\ b_0 &= \approx 27 \delta \end{aligned}$$

Dla sklejk bakelitowej możemy przyjąć z dużym przybliżeniem, że σ_{pl} = σ niszczące. Dla takiej sklejki średnio można przyjąć:

$$\begin{aligned} E &= \approx 90\,000 \text{ kG/cm}^2 \\ \sigma_{nisz} &= \approx 1\,200 \text{ kG/cm}^2 \\ b_0 &= \approx 15 \delta \end{aligned}$$

Oznaczając przez „i” ilość omegówek na części ściskanej, mamy sumaryczną szerokość pracującego pokrycia:

$$B = i (b_0 + c) (5)$$

otóż współczynnik „K” wynosi

$$K = \frac{0,5 i (b_0 + c)}{H} (6)$$

gdzie:

H = całkowita szerokość ściskanej partii skrzydła. Dla skrzydeł drewnianych, krytych sklejką, można również dla listew przyjąć te same wielkości współczynników za wyjątkiem

części ściskanej pokrycia — tylko za „c“ należy przyjąć szerokość klejenia sklejkę pokrycia dla listwy.

Jeżeli poszczególne elementy pracujące są zrobione z różnych materiałów, to należy wszystkie przekroje sprowadzić do „jednorodnego“ przekroju, przez pomnożenie powierzchni przez stosunek modułów sprężystości:

$$K_1 = \frac{E_1}{E_2} \dots \dots \dots (7)$$

Ostatecznie zatem obliczeniowa powierzchnia każdego pracującego elementu przedstawi się wzorem:

$$F_0 = K K_1 F \dots \dots \dots (8)$$

gdzie „F“ oznacza rzeczywisty przekrój.

Po tych uwagach możemy przystąpić do dalszego obliczania kesonu. Gdy zatem stwierdzimy, że na pewnym łuku naprężenia ściskające przekroczą wartości naprężeń krytycznych dla pokrycia, to na długości tego łuku wprowadzamy do obliczeń zmniejszoną powierzchnię „obliczeniową“, jak wyżej podano, i wyznaczamy nowe położenie środka ciężkości, nową oś obojętną i nowy moment bezwładności, który oczywiście będzie mniejszy. Przez przesunięcie osi obojętnej wciągnęliśmy do pracy na ściskanie większą powierzchnię niż przedtem, czyli naprężenia względnie się zmniejszą o tyle samo. Te naprężenia „obliczeniowe“ otrzymamy z wzoru:

$$\sigma_1 = K_1 K_2 \frac{M_e}{I} \dots \dots \dots (8a)$$

gdzie:

e = odległość włókien,

I = moment bezwładności przekroju.

Równocześnie naprężenia otrzymane z wzoru:

$$\sigma_2 = \frac{M_e}{I} \dots \dots \dots (8b)$$

muszą spełniać warunek:

$$\sigma_2 < \sigma_{nisz} \dots \dots \dots (8c)$$

gdzie

σ_{nisz} = σ krytyczne dla usztywniaczy (omegówek). Wielkość naprężenia niszczącego dla rozmaitych materiałów jest podawaną przez różnych autorów pod postacią wzorów empirycznych, względnie można ją każdorazowo wyznaczać przez doświadczenia. Dokładne wyznaczenie tej wielkości jest jednak trudne, gdyż zależy to od sposobu przeprowadzania pomiaru. Jak zatem widać, środek ciężkości i oś obojętna „wędrują“ ku włóknom rozciągany i moment bezwładności się zmniejsza. W miarę wzrostu „n“ należy w ten sposób ciągle przesunąć środek ciężkości i oś obojętną. Skutkiem ciągłego zmniejszania się momentu bezwładności naprężenia będą rosły z jednej strony do naprężeń rozrywających, z drugiej strony do naprężeń krytycznych dla usztywniaczy, aż w granicy keson ulegnie zniszczeniu. Zniszczenie następuje wtenczas, gdy w strefie ściskanej omegówki lub listwy ulegną pełnemu wyboczeniu (złamią się) lub gdy elementy rozciągane ulegną zniszczeniu.

Przy racjonalnym wykorzystaniu kesonu elementy ściskane i rozciągane powinny ulec równocześnie zniszczeniu. Przy tej „wędrowce“ środka ciężkości kąt „ α “ ciągle się powiększa, tzn. że pokrycie na coraz większym łuku jest narażone na wyboczenie. Zależność zmniejszania się momentu bezwładności przekroju od kąta „ α “ przedstawia się w dużym przybliżeniu jako opadający łuk paraboli; zależność wędrowki środka ciężkości od kąta „ α “ przedstawia się mniej więcej jako prosta. Kąt „ α “ będzie nam określał „strefę niestateczności“ przekroju kesonu [14].

Powyższy sposób liczenia kesonów jest oparty na doświadczeniach, gdyż wiadomo, że keson po wyboczeniu się jego ściskanej partii na pewnej przestrzeni może jeszcze zupełnie dobrze „pracować“ na zginanie. Atoli ten sposób jest trochę żmudny i dlatego podam tu jeszcze inny sposób przybliżony, może mniej dokładny lecz prostszy, tym bardziej, że wędrowka środka ciężkości w kesonach skrzydłowych jest małą, mniejszą bez porównania niż wędrowka środka ciężkości w kadłubach powłokowych (skorupowych). Mianowicie z góry przyjmujemy pewną część kesonu pracującą na ściskanie i powierzchnię przekroju tej części redukujemy przy pomocy współczynników K i K_1 . Zwykle przyjmuje się za nią górną część profilu. Następnie wyznaczamy „obliczeniowy“ środek ciężkości, oś obojętną itd. i obliczamy wprost naprężenia niszczące. Według [8] wielkość współczynnika „K“ dla całkowitej ściskanej strefy kesonów normalnego typu wynosi około 0,1—0,2. Oczywiście, naprężeniami niszczącymi będą naprężenia rozrywające i krytyczne dla usztywniaczy.

Gdy w skład kesonu, wchodzi pewne powierzchnie krzywe, to należy w danym przekroju linię krzywą podzielić na małe łuki i uważać je za odcinki proste, sprowadzając w ten sposób powierzchnię np. przekroju pokrycia, do małych prostokątów.

2. Środek sił poprzecznych.

Środek sił poprzecznych jest w ogólności punktem charakterystycznym dla rozkładu sił ścinających, a zatem do jego wyznaczenia należy brać pod uwagę tylko te elementy, które mają przenosić siły ścinające. Do tych elementów należy zaliczyć w pierwszym rzędzie pokrycie, ścianki dźwigarów, w wypadkach skrzydeł wielodźwigarowych ścianki wewnętrzne itd. itd., natomiast nie należy zaliczać pasów dźwigarowych, które same jako takie posiadają małą sztywność skrętną. Ogólny sposób znachodzenia środka sił poprzecznych dla skrzydła wielodźwigarowego podaje bardzo dokładnie Billewicz [10]. Sposób znalezienia tego punktu dla kesonu jednodźwigarowego podają Billewicz - Grzędzielski [2]. Sposobów tych zatem tutaj przytaczać nie będę.

Przy obliczaniu środka sił poprzecznych oczywiście należy uwzględnić wielkość współczynnika sprężystości postaciowej „G“, który może być różny dla poszczególnych elementów.

Wspomnę tu jeszcze o używanym sposobie znachodzenia środka sił poprzecznych przy po-

mocy momentów bezwładności, podawanym przez Burgess'a, inżynierów sowieckich itd. [8]. Metoda ta odnosi się jednak do założenia, że strzałki ugięcia wszystkich elementów, pracujących na zginanie, są jednakowe, co niezawsze jest słuszne. Aby ta metoda była słuszną, powinny momenty bezwładności przekrojów dźwigarów (np. w skrzydle wielodźwigarowym) zmieniać się wzdłuż rozpiętości wedle tego samego prawa. W wypadku różnych praw zmiany tych momentów bezwładności metoda ta daje wyniki przybliżone. Dalej metoda ta odnosi się właściwie tylko do skrzydeł dwu- i wielodźwigarowych bez współpracy pokrycia. Sposób ten polega na tym, że w każdym dźwigarze tzn. elemencie pracującym na zginanie, zaczepiamy w kierunku prostopadłym do cięciwy siłę o wielkości, równej momentowi bezwładności dźwigara w danym przekroju. Następnie znajdujemy wypadkową siłę graficznie lub z równania:

$$a_0 = \frac{\sum I_i a_i}{\sum I_i} \quad \dots \quad (10)$$

gdzie:

I_i = moment bezwładności całego przekroju „i-tego” dźwigara,

a_i = odległość „i-tego” dźwigara od prostej prostopadłej do cięciwy, a stycznej do krawędzi natarcia skrzydła,

a_0 = odległość wypadkowej od powyższej prostej.

Punkt przecięcia się tej wypadkowej z prostą równoległą do cięciwy profilu, przechodzącą przez środek ciężkości, przyjmują za środek sztywności. Według [8] ta prosta jest osią obojętną dla danego kierunku płaszczyzny momentu pary zginającej (prostopadłego do cięciwy). Nie jest to jednak ściśle ujęcie zagadnienia. Mianowicie w przekroju o 2 osiach symetrii środek sił poprzecznych leży na przecięciu się tych 2 osi i pokrywa się ze środkiem ciężkości. W przekroju o 1 osi symetrii już środek ciężkości nie pokrywa się ze środkiem sił poprzecznych, atoli ten ostatni leży na osi symetrii. Gdy płaszczyzna momentu pary zginającej przechodzi przez środek sił poprzecznych i jest prostopadłą do osi symetrii, to ta oś symetrii jest wtedy osią obojętną. W wypadku 2 osi symetrii są one zarazem głównymi osiami bezwładności przekroju, w wypadku istnienia 1 osi symetrii stanowi ona jedną główną oś bezwładności przekroju. Jednak, gdy przekrój nie posiada żadnej osi symetrii, to środek sił poprzecznych w ogólności nie leży na żadnej z głównych osi bezwładności przekroju. Przez analogię do tych szczególnych wypadków wynikają poprzednio podane twierdzenia o środku sztywności tym bardziej, że przy stosowanych dzisiaj profilach szybkościowych błąd popełniany przez użycie tej metody nie będzie zbyt duży. Twierdzenie to mogłoby być zupełnie ściśle dla profilu symetrycznego przy symetrycznym ułożeniu elementów, pracujących na zginanie.

Powyższa metoda zastosowana do skrzydła dwudźwigarowego bez współpracy pokrycia doprowadza w wyniku do znanego wniosku, że

odległości środka sztywności od dźwigarów są odwrotnie proporcjonalne do sztywności tych dźwigarów.

Według [8] wyznacza się środek sztywności jako środek ciężkości momentów bezwładności dźwigarów, omegówek, zetówek i pracującej części pokrycia. Tzn. na przekroju każdego z tych elementów wyobrażamy sobie przyłożoną powierzchnię równą własnemu momentowi bezwładności tego przekroju i wyznaczamy środek ciężkości tych pól.

Wreszcie stosują następujący sposób wyznaczenia środka sztywności: przez środek ciężkości prowadzimy 2 osi, jedną równoległą do cięciwy, drugą prostopadłą do niej. Następnie znajdujemy 2 proste według równań (11 i 12):

$$x = \frac{\sum_0^i I_{xxi} X_i}{\sum_0^i I_{xxi}} \quad \dots \quad (11)$$

$$y = \frac{\sum_0^i I_{yyi} Y_i}{\sum_0^i I_{yyi}} \quad \dots \quad (12)$$

$$I_{xxi} = I_{xwi} + F_i y_i^2 \quad \dots \quad (13)$$

$$I_{yyi} = I_{ywi} + F_i x_i^2 \quad \dots \quad (14)$$

gdzie:

x, y = równania szukanych 2 linii prostych, które na przecięciu się wyznaczają szukany środek sztywności, czyli są to zarazem współrzędne środka sztywności,

I_{xxi}, I_{yyi} = momenty bezwładności dźwigarów i innych elementów względem osi, przechodzących przez środek ciężkości kesonu, x_i, y_i = odległości środków ciężkości tych elementów od powyższych osi,

I_{xwi}, I_{ywi} = momenty bezwładności własne przekrojów poszczególnych elementów tzn. względem osi przechodzących przez ich środki ciężkości,

F_i = powierzchnie przekrojów poszczególnych elementów.

Metoda ta różni się od poprzedniej tym, że zamiast własnych momentów bezwładności wprowadzamy momenty bezwładności względem osi przechodzących przez środek ciężkości. O ile to założenie odnosi się do 2 elementów, pracujących wspólnie i złączonych ze sobą, jak np. do pasów dźwigarów, to jest ono zupełnie słuszne; jednakże, o ile to założenie odnosi się do elementów takich jak omegówki, pracujące bez żadnego pionowego usztywnienia, to budzi ono pewne zastrzeżenia, gdyż elementy takie pracują w dużym stopniu same, swobodnie (o ile nie uwzględniać połączenia z pokryciem) a więc w obliczeniach powinny wejść tylko ich własne momenty bezwładności. We wzorach (13 i 14) opuszcza się prawie zawsze własne momenty bezwładności jako bardzo małe wobec pozostałego wyrazu.



3. Oś obojętna przy założeniu, że siła poprzeczna przechodzi przez środek ciężkości przekroju.

W tym wypadku prowadzimy zwykle przez środek ciężkości 2 proste: jedną równoległą do cięciwy, drugą prostą. Czasami już te proste uważamy za główne osi bezwładności. Chcąc je znaleźć dokładnie, obliczamy momenty bezwładności wszystkich pól przekrojów obliczeniowych „F₀” względem tych 2 osi I_x i I_y i moment zbieżności I_{xy}. Kąt nachylenia osi głównych do osi przyjętych da nam wzór:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2 I_{xy}}{I_y - I_x} \dots (15)$$

Następnie obliczamy główne momenty bezwładności i kreślimy centralną elipsę bezwładności. Z kolei przez środek ciężkości prowadzimy prostą o kierunku danej siły poprzecznej — będzie to kierunek płaszczyzny momentu pary zginającej — i dla tej prostej znajdujemy przy pomocy prostych stycznych lub przez powinowactwo z kołem przy pomocy metod geometrii wykreślnej średnicę sprzężoną z daną. Będzie to szukana oś obojętna. Prościej można postąpić w ten sposób, że rozkłada się dany moment na 2 kierunki głównych osi bezwładności.

4. Oś obojętna przy założeniu, że siła poprzeczna nie przechodzi przez środek sił poprzecznych przekroju.

Według zdań niektórych badaczy należy w tym wypadku przesunąć kierunek płaszczyzny momentu pary zginającej równoległe do środka ciężkości i znaleźć oś obojętną — jak w przypadku poprzednim — przy pomocy elipsy bezwładności. Wynikałoby z tego, że położenie osi obojętnej nie zależy od tego, czy środek sił ścinających pokrywa się ze środkiem ciężkości, czy też nie.

III. Wyznaczanie naprężeń

1. Naprężenia od momentów zginających

Naprężenia te wyznacza się przy pomocy znanych wzorów wytrzymałościowych. Zwykle zgię-

cie kesonu następuje w 2 płaszczyznach: jednej prostopadłej do cięciwy, drugiej równoległej do cięciwy czyli od 2 obciążeń: normalnego i stycznego. Dla każdego elementu należy znaleźć sumę normalnych naprężeń. Według [8] naprężenia od zginania siłami stycznymi nie przewyższają 10% naprężeń od zginania siłami normalnymi. Zginanie w płaszczyźnie równoległej do cięciwy w wypadku np. skrzydła wielodźwigarowego będzie głównie obciążać dźwigar pierwszy i ostatni.

2. Naprężenia ścinające.

Sposób znachodzenia naprężeń ścinających od momentów skręcających i od sił poprzecznych podają dokładnie i dla skrzydeł wielodźwigarowych np. Grzędzielski, Billewicz, Kisielew, Ebner i inni. Tu tylko podam pewne uproszczenia stosowane przy obliczaniu tych naprężeń.

a) Przy obliczaniu naprężeń ścinających od momentów skręcających bardzo często stosuje się nawet dla skrzydeł wielodźwigarowych prosty wzór dla przekroju pierścieniowego bez uwzględnienia ścianek wewnętrznych, wychodząc z założenia, że grubość pokrycia (blachy czy sklejk) musi być dostosowana do grubości „handlowej”, zmieniającej się przecież skokami. W rezultacie więc obliczenia dokładne i przybliżone prowadzą bardzo często do tych samych praktycznych wyników.

b) Przy obliczeniu naprężeń ścinających od sił poprzecznych np. skutkiem obciążenia normalnego bierze się pod uwagę tylko ścianki pionowe wewnętrzne, nie uwzględniając tego, że pokrycie również przenosi część tych sił. Zatem we wzorze:

$$\tau = \frac{Q S}{I \Sigma \delta} \dots (16)$$

za „ δ ” przyjmujemy tylko grubości ścianek pionowych wewnętrznych.

Przy dokładniejszym obliczaniu należałoby uwzględnić zginanie w pionowych płaszczyznach poszczególnych przekrojów, co możnaby nazwać „zginaniem poprzecznym”.

LITERATURA

- [1]. Aleksander Grzędzielski. O pewnym wypadku współdziałania dźwigarów skrzydłowych. Sprawozdania IBTL. Nr. 1 (13) 1934.
- [2]. W. Billewicz i A. Grzędzielski. Obliczanie skrzydła jednodźwigarowego. Sprawozdania IBTL. Nr. 2 (17). 1935.
- [3]. Léon Kirste, inż.-dok. Sur le calcul des poutres en caisson. L'Aérotechnique — Nr. 169 i Nr. 173, 16 Rocznik. Styczeń i Maj 1937. L'Aéronautique. Nr. 212 i 216. Styczeń i Maj 1937.
- [4]. Dr. Ing. A. Föppl i Dr. L. Föppl. Drang und Zwang. Monachium 1928.
- [5]. C. Weber. Z. f. angew. Math. u. Mech. 1924. Tom 4. Str. 334.
- [6]. R. Maillart. Der Schubmittelpunkt. Schweiz. Bauz. 1924. Tom 83.
- [7]. C. Weber. Z. f. ang. Math. u. Mech. 1926. t. 6. str. 85.

Komisja Pomocy Naukowych
Kola Geodetów St. P. W

- [8]. Sprawozdania kniga po rasczetu samoleta na proczność. Onti NKTR CCCR. 1937.
- [9]. W. F. Kisielew. Obliczenie skrzydeł wielodźwigarowych na skręcanie. Notatki techniczne C. A. G. I. Nr. 89.
- [10]. Dr. Inż. W. Billewicz. Obliczanie skrzydeł wielodźwigarowych. Techniczne Nowości Lotnicze. 1936. Nr. 4, 5, 7, 9.
- [11]. Inż. S. I. Makarow. Obliczanie cienkościennych konstrukcji, Technika Wozdusznego Flota. 1935. Nr. 7.
- [12]. M. T. Huber. Wytrzymałość na czyste zginanie prętów metalowych. Przegląd Techniczny. Nr 7. 1934.
- [13]. H. Ebner. Zur Festigkeit von Schalen -und Rohrholmflügeln. Luftfahrtforschung. Lfg. 4/5. B. 14. 1937.
- [14]. Inż. P. Biolkowicz. Nowe metody obliczeń kadłubów skorupowych. Techniczne Nowości Lotnicze. Kwiecień, maj 1937.





WDZISŁAW SIKORSKI

629.13 (061) (09)

NIECO HISTORII

Dziwny może się wydawać fakt urządzenia I Krajowej Wystawy Lotniczej przez Lwów, a nie przez stolicę, mającą przez swe uprzemysłowienie więcej danych ku temu. Gdy jednak zagłębimy się nieco w dzieje naszego lotnictwa zrozumimy, że Lwów w tym wypadku pozostał jedynie wierny swej lotniczej tradycji. Tak się dziwnie składa, że prawie wszystkie „rewolucyjne” poczynania lotnicze w Polsce mają we Lwowie swój początek i stąd jako „nowinki” wędrują dalej. Nic też dziwnego, że Lwów jest siedzibą najstarszej polskiej organizacji lotniczej jaką jest Związek Awiatyczny Studentów Politechniki.

Powstał on w czasie, gdy lotnictwo światowe stawiało swe pierwsze kroki i było owiane mgłą tajemniczości i romantyzmu. Od chwili wykonania pierwszego lotu na aparacie cięższym od powietrza w grudniu 1903 r. (bracia Wright) datuje się okres prób i doświadczeń, mających udoskonalić ten epokowy wynalazek. Pierwszy tego rodzaju lot znalazł wielu naśladowców w całym świecie, a zwłaszcza we Francji, która wkrótce stała się przodowniczką w tej najmłodszej gałęzi techniki. Nazwiska takich konstruktorów i pilotów jak Farman, Blériot, Santos-Dumont przeszły do historii.

Te poczynania lotnicze znalazły we Lwowie wielu entuzjastów, zwłaszcza wśród młodzieży technicznej. Ludzie ci pociągnięci nieprzepartym urokiem lotnictwa stworzyli Związek Awiatyczny grupujący studentów Politechniki. Dnia 6. XI. 1909 r. z inicjatywy inż. Libańskiego odbyło się pierwsze konstytuujące zebranie. Związek Awiatyczny od samego początku swego istnienia cieszył się czynnym poparciem i opieką profesorów Hubera i Sochackiego. Od czasu swego powstania aż do wojny światowej rozwijał Zwią-

zek ożywioną działalność naukową i propagandową. W roku 1910 urządzono szereg wykładów o lotnictwie oraz sprowadzono pilota francuskiego Granda, który wykonał kilka udanych wzlotów (po raz pierwszy we Lwowie).

W jesieni tego roku Związek Awiatyczny zorganizował imprezę, która obecnie zasługuje na specjalne podkreślenie. Imprezą tą była I Wystawa Awiatyczna w gmachu Politechniki. Wystawiono na niej kilka samolotów polskiej konstrukcji, liczne modele, zdjęcia, mapy itd. Wystawa ta musiała być poważniejszym przedsięwzięciem, jeżeli obejmowała również szereg eksponatów firm zagranicznych. W roku 1911 uruchomił Związek pierwszą w Polsce modelarnię lotniczą. Ciekawym faktem ilustrującym wszechstronną działalność Związku jest memoriał wystosowany do władz Politechniki domagający się utworzenia laboratorium aerodynamicznego i katedry lotnictwa.

Tak owocną działalność Związku Awiatycznego przerwała na długie lata zawierucha wojny światowej. Wielu członków Związku służyło w obcych formacjach lotniczych ginąc często za cudzą sprawę. Niektórym tylko było danym zginąć w walkach wyznaczających granice wolnej Ojczyzny. Nazwiska takich bohaterów powietrznych jak Bastyr, Stec, Toruń nie zostaną nigdy zapomniane. Działalność swą wznowił Związek dopiero w roku 1923. Praca była trudna, gdyż należało odrobić długoletnią przerwę, w czasie której lotnictwo poczyniło olbrzymie postępy. Praca ograniczała się początkowo do propagandy, kompletowania biblioteki naukowej i starań o utworzenie Studium Lotniczego na Politechnice.

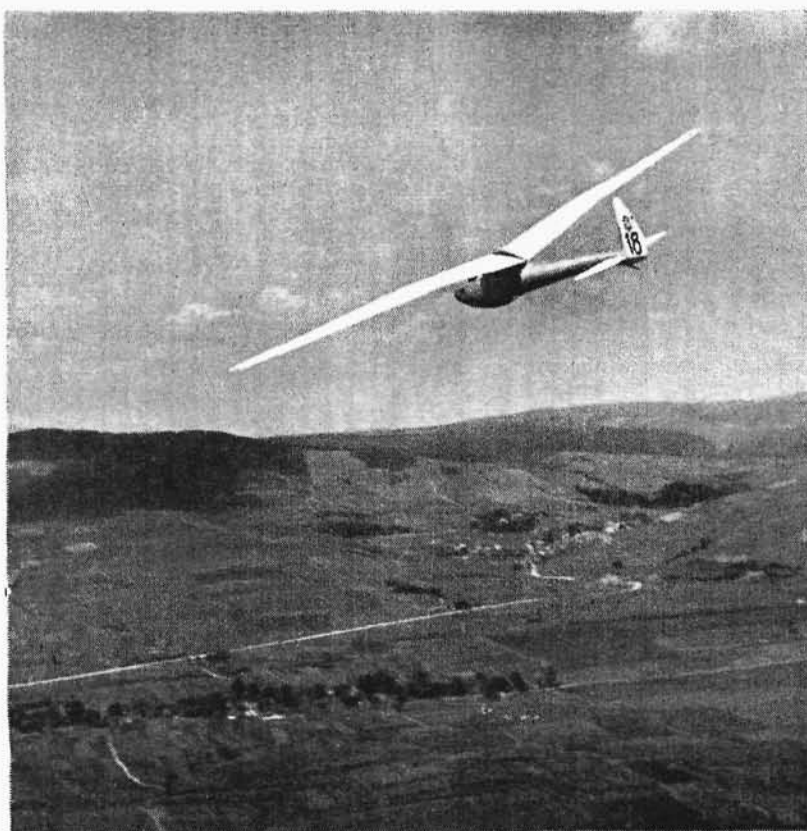
W roku 1924 rozpoczęto prace w dziedzinie szybownictwa, które doprowadziły w latach na-

stępnym do tak pięknych wyników. W tym właśnie roku przystąpiono do budowy szybowca CW-1 konstrukcji kol. W. Czerwińskiego. Budowa ta z powodu dużych trudności, wynikłych z braku odpowiedniego pomieszczenia, przeciągnęła się aż do roku 1927. Na wiosnę 1928 r. doszła do skutku I Wyprawa Szybowcowa na tereny położone w okolicy Złoczowa. Wyprawa ta może poszczycić się lotem trwającym 4 minuty 13 sekund wykonanym przez pilota S. Grzeszczyka (był to ówczesny rekord Polski). Lot ten miał duże znaczenie, gdyż przełamał nieufność jaką żywiono do szybownictwa po pierwszych nikłych rezultatach osiągniętych na konkursach w Białce i Gdyni. Zrozumiano wówczas, że i w Polsce można latać bez silnika! Od tej chwili datuje się szybki rozwój polskiego szybownictwa, a Lwów staje się centrem skąd wychodzą coraz to nowi konstruktorzy i piloci. Powstają nowe typy szybowców konstrukcji kol. W. Czerwińskiego, jak CW-2 (treningowy) i CW-3 (szkolny). Szybowce te wkrótce zdają egzamin ze swej użyteczności na nowym szybowisku w Bezmiechowej. Bezmiechowa ta najbardziej obecnie popularna i na najwyższym poziomie stojąca szkoła szybowcowa powstała dzięki inicjatywie grupy członków Związku Awiatycznego i Aeroklubu Lwowskiego, którzy w styczniu 1929 r. tereny te dokładnie zbadali. Następna wyprawa szybowcowa na wiosnę 1929 roku podwyższa rekord Polski do 2 godz. 11 min. 5 sek. (pilot Grzeszczyk na szybowcu CW-2). Wkrótce w warsztatach Związku Awiatycznego zostają zbudowane nowe szybowce rekordowe CW-4 i CW-5. Szybownictwo nasze rozwija się teraz żywiołowo i zajmuje wkrótce obok Niemiec czołowe miejsce w Europie. Ta pionierska praca Związku Awiatycznego została okupiona dużymi trudami i ofiarami — nie brakło nawet ofiary życia ludzkiego. Giną w katastrofach szybowcowych śp. Zygmunt Laskowski b. prezes Związku Awiatycznego i śp. Adam Nowotny uczestnik wszystkich wypraw szybowcowych, a równocześnie kierownik Instytutu Techniki Szybownictwa.

Ponieważ Związek Awiatyczny będący kołem naukowym nie mógł zająć się wyszkoleniem odpowiedniej ilości pilotów, więc z inicjatywy członków Związku dochodzi do skutku pierwsze organizacyjne zebranie „Akademic-

kiego Aeroklubu we Lwowie“ (w lutym 1927 r.). Wreszcie Związek Awiatyczny zwraca swą działalność w kierunku zapewnienia pomocy naukowej dla studentów nowoutworzonego Studium Lotniczego. Pomoc ta polega na prowadzeniu biblioteki z działem katalogów technicznych, urządzaniu zebrań z referatami naukowymi oraz organizowaniu wycieczek na wystawy lotnicze zagranicę (Paryż i Mediolan) i do krajowych fabryk lotniczych.

Jednak tak piękna tradycja Związku Awiatycznego nie może pozostać bez wpływu i na obecny jego charakter. Nie też dziwnego, że mimo dużych trudności (zwłaszcza finansowych) Związek popiera wszelkie prace konstrukcyjne swych członków. W dziale płatowcowym prace te idą w kierunku stworzenia słabosilnikowego płatowca popularnego. Wynikiem tego było zbudowanie w 1935 roku płatowca „Pout du Ciel“ będącego wówczas na zachodzie ostatnim „krzykiem mody“ w tej dziedzinie. Niestety nadzieje w nim pokładane zawiodły i wobec tego rozpoczęto prace nad innym rozwiązaniem problemu taniego i łatwego latania. Równocześnie pracowano nad stworzeniem silnika do takiego popularnego płatowca. Zbudowano silniki JS-3 i JS-4 konstrukcji kol. Szablowskiego oraz opracowano dalsze konstrukcje, które wkrótce zostaną zrealizowane. Jak widać z tego krótkiego przeglądu prac i osiągniętych wyników, Lwów na terenie którego działa Związek Awiatyczny zasłużył sobie w pełni na miano kolebki polskiego lotnictwa.



Widok śródmieścia Lwowa z lotu ptaka (ryc. u góry na lewo)

Fot. Kazimierz Jaklewicz, por. obs.

Szybowiec wyczynowy „SG 93“ (obok) konstrukcji inż. Szczepana Grzeszczyka

Fot. inż. Jerzy Solak

