



*UNIVERZA V LJUBLJANI*

**Fakulteta za strojništvo**



Visokošolski strokovni študij, leto 2005/2006

*SISTEMI NA LETALU I*

Seminar iz predmeta:  
SISTEMI NA LETALU I  
**ZGODOVINSKI RAZVOJ LETALSKIH  
KONSUKCIJ**

Nosilec predmeta: T. Kosel

Jesenice, 10. jun. 06

avtor: Aleš Svetina

*Boštjan Kajfež*



## ZGODOVINSKI PREGLED RAZVOJA LETALSKIH STRUKTUR

### **1. Pionirsko obdobje do 1. poleta z motornim letalom leta 1903**

#### Kronološko zaporedje:

- Dedal in Ikar iz grške mitologije pred našim štetjem, sta v zgodovino zapisana kot najbolj poznana mitološka letalca.
- Leonardo da Vinci, vsestranska osebnost renesanse (umetnik, znanstvenik, inženir,...). Iz leta okrog 1500 so ohranjene skice helikopterja, padala, študije ptičjega leta.
- Posnemovalci Leonarda da Vincija v kasnejših stoletjih. Vendar s posnemanjem ptic ni uspelo nikomur poleteti.
- V obdobju od 1750 do 1900 so bili bolj prisotni aerostati in sicer najprej baloni, kasneje pa tudi zračne ladje.
- Otto Lilienthal (Nemčija) je med leti 1891 in 1896 kot prvi človek resnično uspešno letel z jadrnim letalom. Do tragične smrti na svojem zadnjem poletu se je temeljito ukvarjal tako z gradnjo letalne naprave kot s tehniko letenja. Ključni del njegove letalne naprave je togo krilo (togost je dosežena z žicami), krmari se jo spreminjanjem telesa glede na krilo (kot zmaj), oblikovano pa je krilo bolj podobno netopirju kot ptiču.
- Brata Wright (ZDA) sta 1903 leta izvedla prelomni prvi polet z motornim letalom. Njuno letalo je razmeroma veliko saj poleg človeka nosi tudi motor, racman konfiguracije, vse tri površine (glavno krilo, predne krilo, smerni rep) so dvojine. Pri tedanjem stanju tehnike je bila to neposredna pot do »zadostne kvadrature« ob še sprejemljivim letalom.

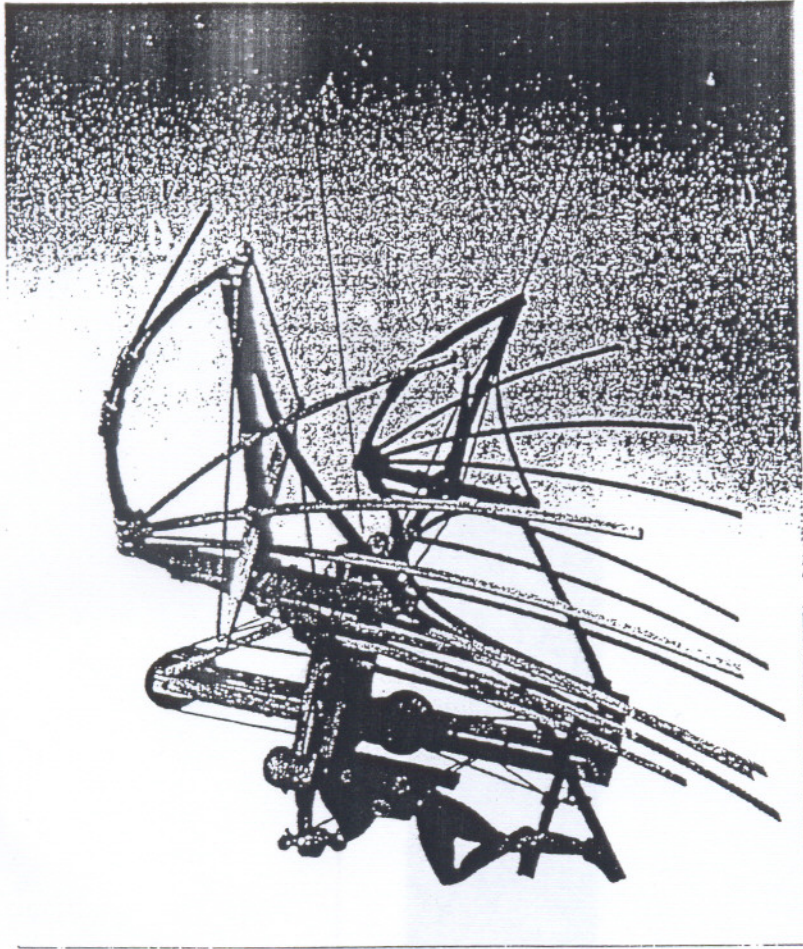
#### Ključne značilnosti tega obdobja:

- Razrešiti temeljni princip letenja. Izkazalo se je, da je bilo lažje izdelati letalo s togim krilom (ki zagotavlja vzgon) in pogonskim sklopom (ki zagotavlja pogonsko silo v smeri leta), kot letalo z gibkim mahajočim krilom namreč še do danes ni bilo izdelano.
- Izdelati zadosti lahko (po masi) letalno napravo.

#### Neposredne posledice zgoraj navedenih značilnosti se seveda odražajo na letalnih napravah tega obdobja:

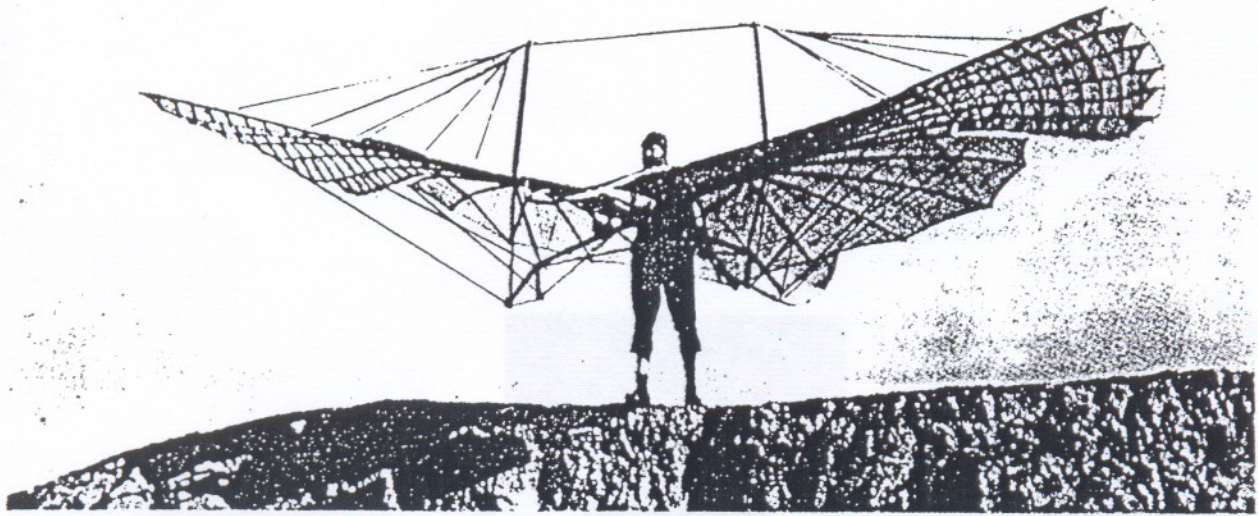
- prevladujejo šibke, mnogokrat (tudi namenoma) zelo podajne strukture,
- dimenzioniranje predvsem »po občutku«,
- material: les, jeklena žica, platno.



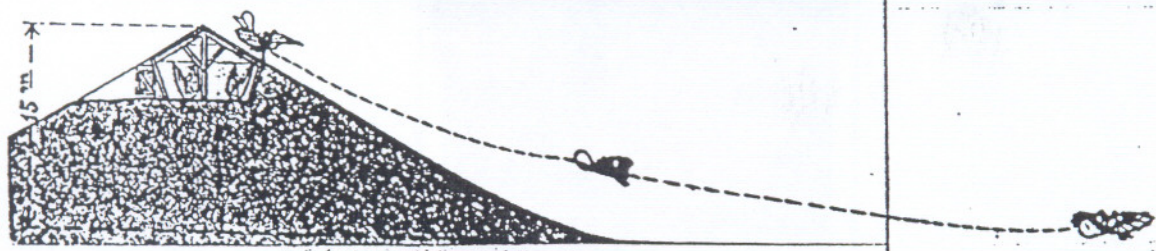
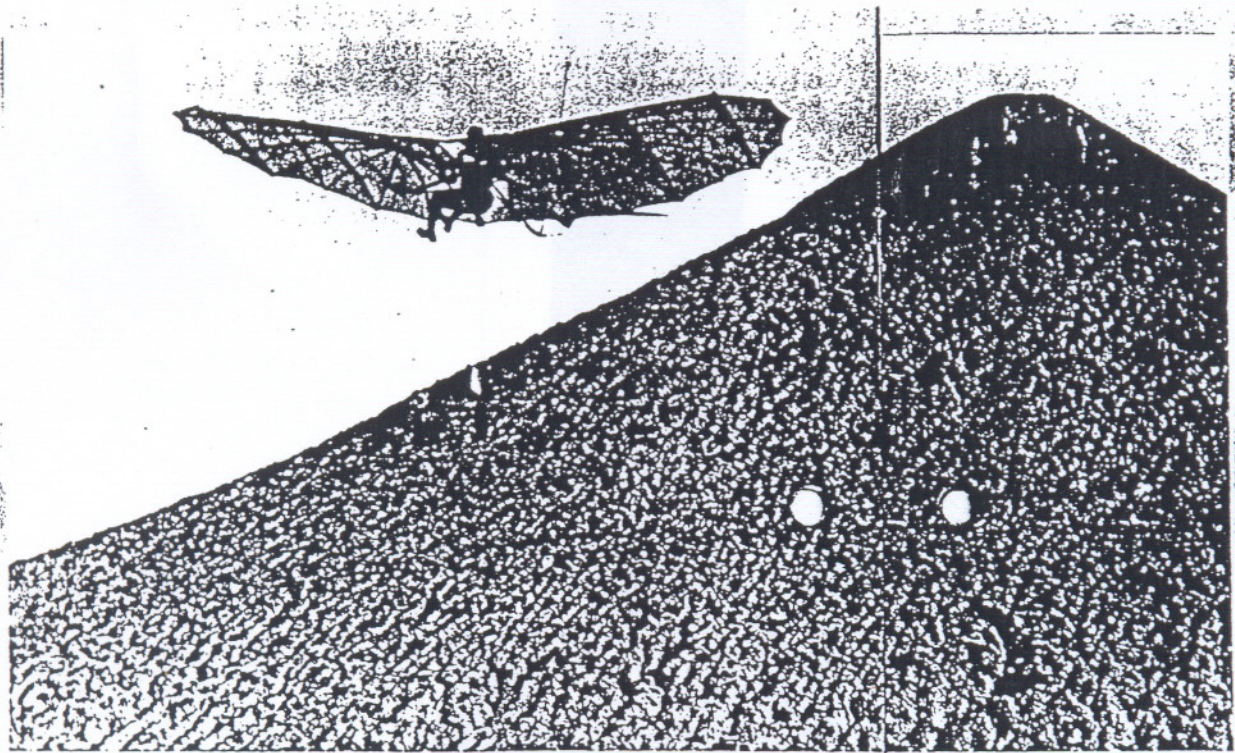


Rekonstrukcija mahokrilca po skicah L. da Vincija  
(Vir: revija Kriła, 1999)



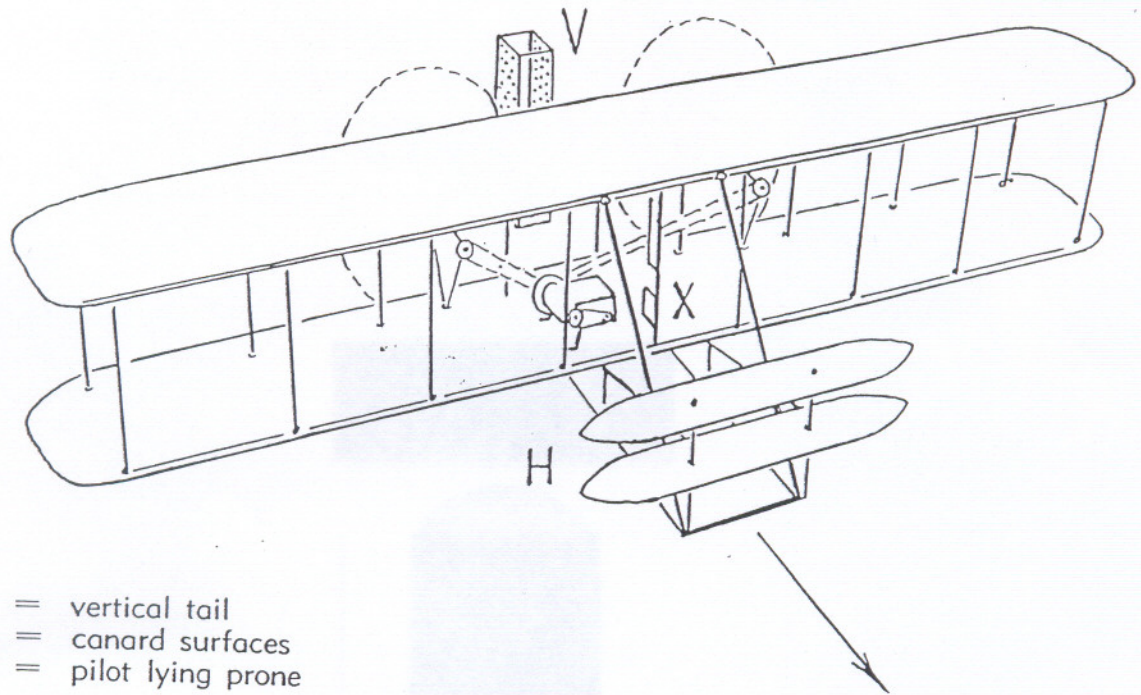


Lilienthalov enokrilec (številka 11), 1894 (Vir: Jadrano letalstvo, 1986)



Umetno nasota vzpetina blizu Berlina, 1894 (Vir: Aerokurier, 1991)

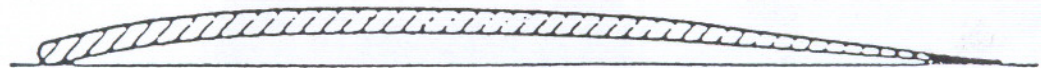




- V = vertical tail  
 H = canard surfaces  
 X = pilot lying prone

Figure 15. View of the 1903 Wright Brothers' canard-type pusher-propeller airplane (33), having  $b = 40.3$  ft,  $c = 6.5$  ft,  $S = 510$  ft<sup>2</sup>,  $W = 605$  lb plus pilot  $\approx 755$  lb. For a reported speed ("indicated", against wind) of 31 mph, the lift coefficient is  $C_L = (755/2.5 \cdot 510) = 0.59$ . Applying biplane theory (Chapter VII) the induced drag coefficient is estimated to be  $C_{Di} = 0.028$ . The Wright Brothers' gasoline engine is reported to have developed 12 HP. Assuming a mechanical efficiency of 0.92 and a propeller efficiency of 0.71, the total drag is found to be  $D = \eta P/V = 0.65 \cdot 12 \cdot 550/45.5 = 94$  lb. The corresponding drag coefficient is  $C_D = 94/(2.5 \cdot 510) = 0.074$ . This value is roughly two times the coefficient "due to lift" (which is the induced drag coefficient as above, plus an appreciable component of parasitic drag due to lift). It can therefore be concluded that the world's first powered airplane flight was performed at or near the lift coefficient for optimum gliding. The gliding ratio is  $L/D = C_L/C_D = 0.59/0.074 = 8$ . Other flights of the Wright Brothers in the years following their historic deed, in airplanes of much the same dimensions, were made with the aid of "stronger" engines (such as 27 HP, for example, in 1908).

Letalo bratov Wright, 1903 (Vir: Hoerner FDD, 1965)

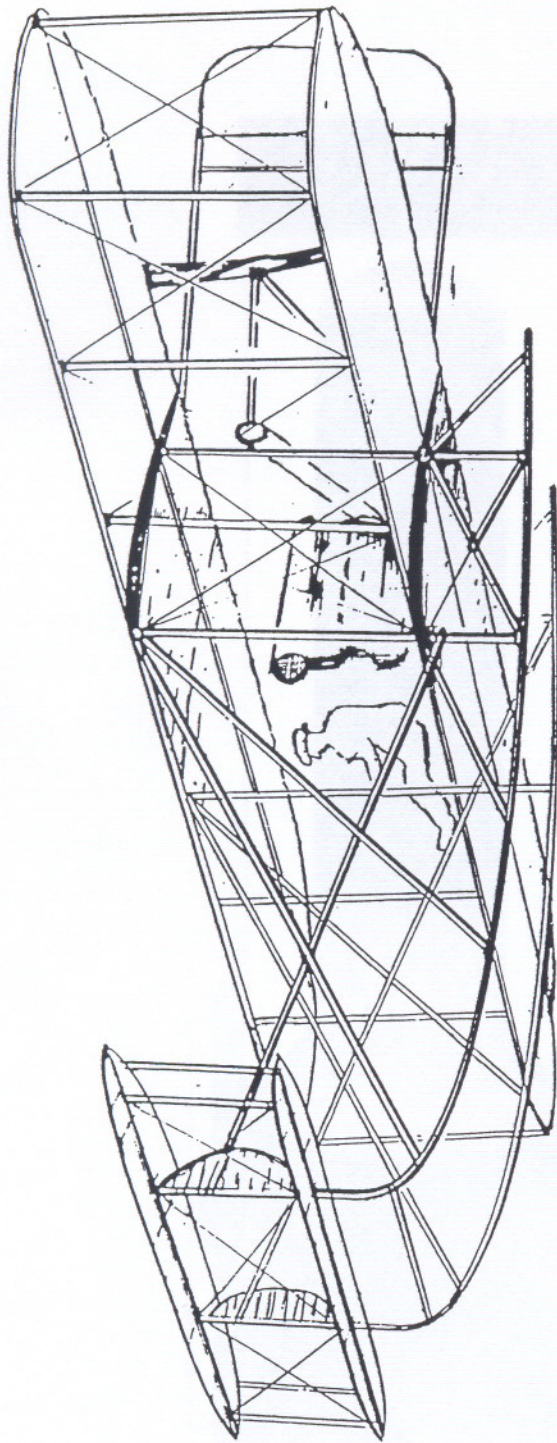


Profil krila letala Wright 1903 (Vir: Hises, 1959)



stojna polica  
oz. navp. opornica

diagonalna  
žica



Dvojne aerodin. površine  
omogućuju štaklasto izradbo



Letalo bratov Wright, 1903 (Vir: Cotler, 1992)



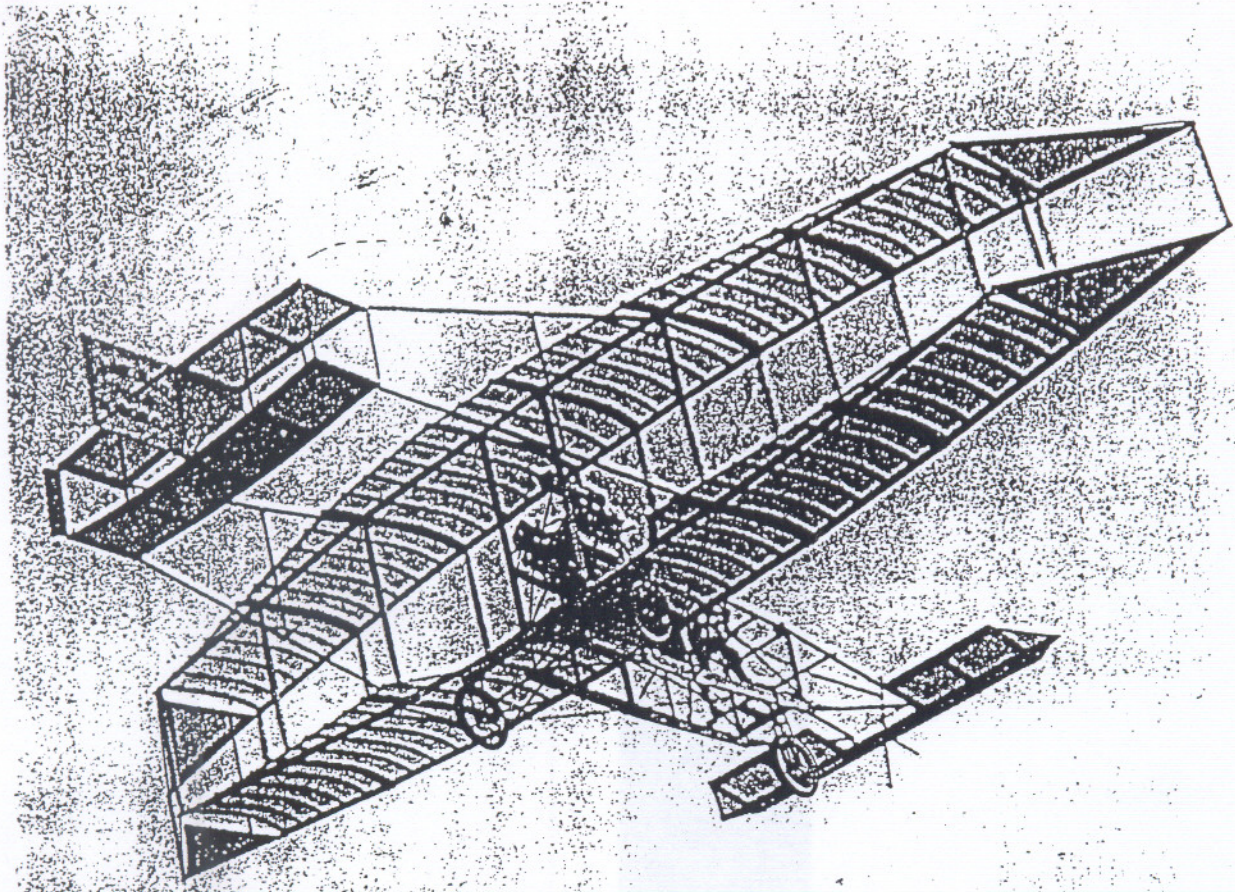
## 2. Obdobje od leta 1903 do konca 1. svetovne vojne

Uspeh bratov Wright je močno vzpodbudil tako načrtovanje in izdelavo novih letal kot njihovo preizkušanje in dokazovanje v zraku, v ZDA in Evropi. Prirajali so letalske mitinge. V Evropi je razvoj pospešila tudi bližajoča vojna.

Prevladujoči tip letala tega obdobja ima sledeče značilnosti:

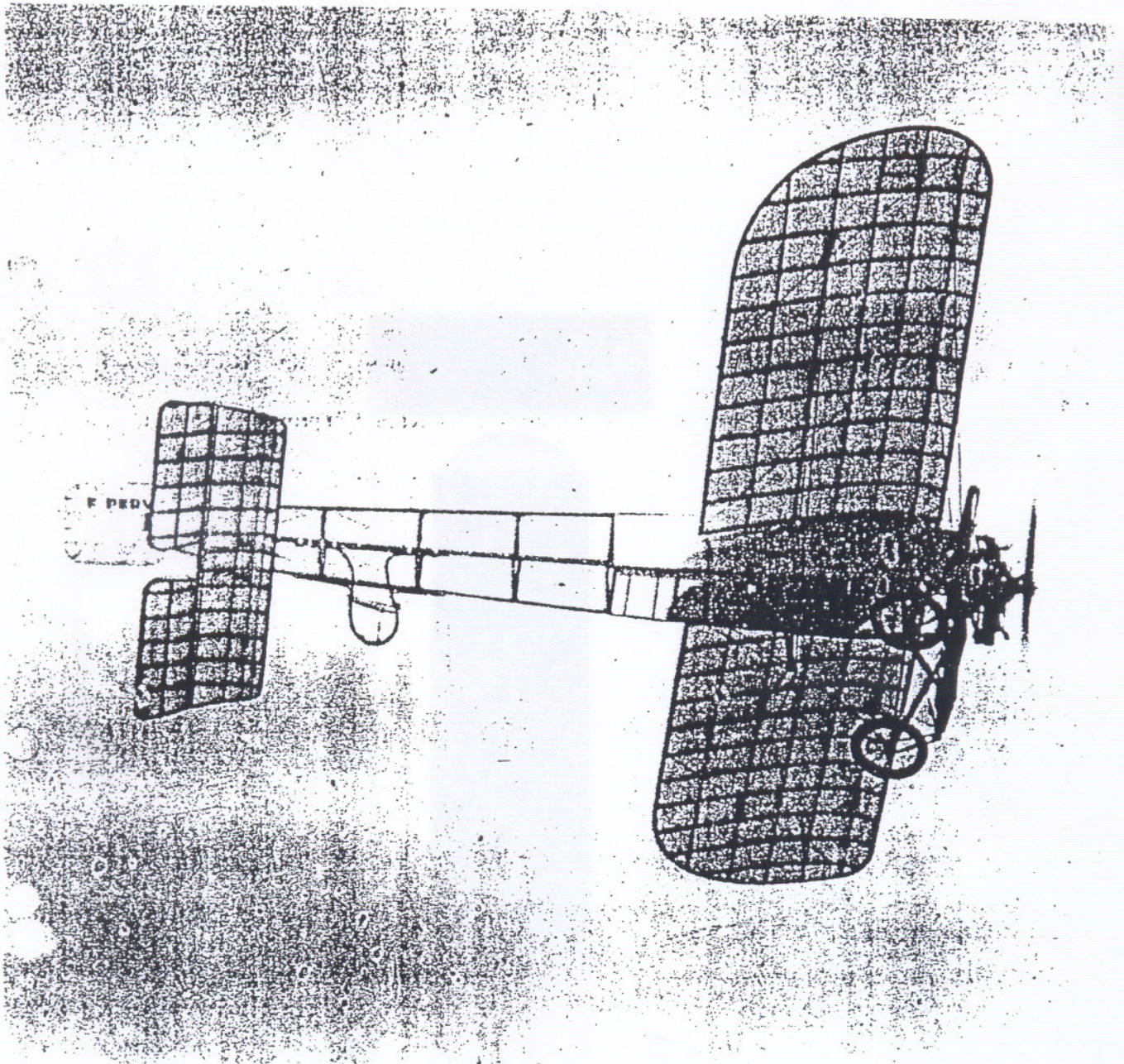
- Trup je sestavljen iz vzdolžnih in prečnih palic, ki so med seboj povezane z notranjimi vezmi (žicami) v togo strukturo. Od dosežene togosti je potem odvisno ali so potrebne tudi zunanje vezi, predvsem do krila. Trup je bodisi prekrit s platnom ali pa je brez prekritja.
- Krilo je sestavljeno iz dveh ali več nosilcov, reber in notranjih žičnih vezi. Dve krili dvokrilca sta med seboj povezani z zunanjimi vezmi, to so opornice in žice. Krilo je prekrito s platnom.
- Prevladuje les.
- Prevladujejo dvokrilci in podvozje tipa »bicikel«, to je dve glavni kolesi in repno kolo ali smučka.
- Ključni deli se praviloma že dimenzionirajo računsko in tudi testirajo, ostali del pa »po občutku«.





1908 Curtiss "June Bug" (Vir: Sport Aviation, 1992)

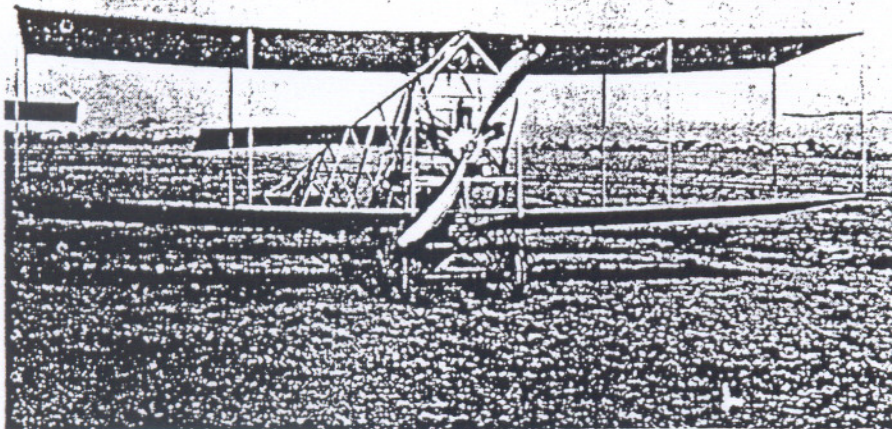




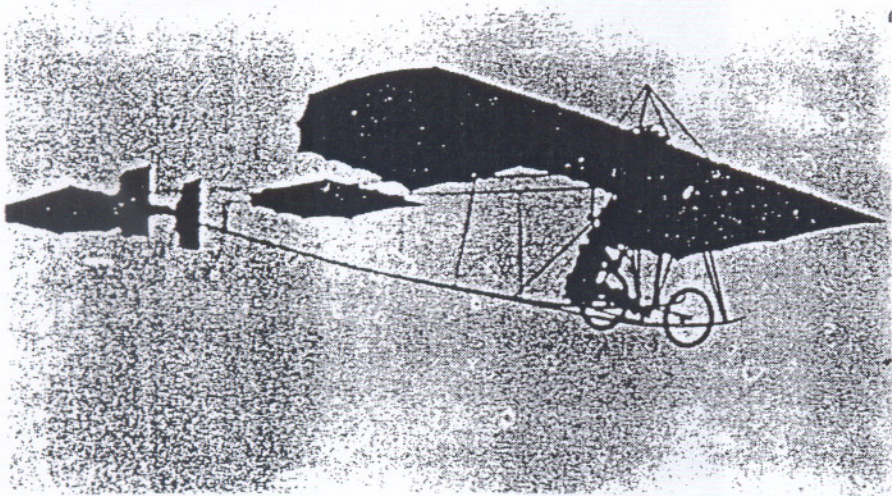
Bleriot, 1909

(Vir: ?

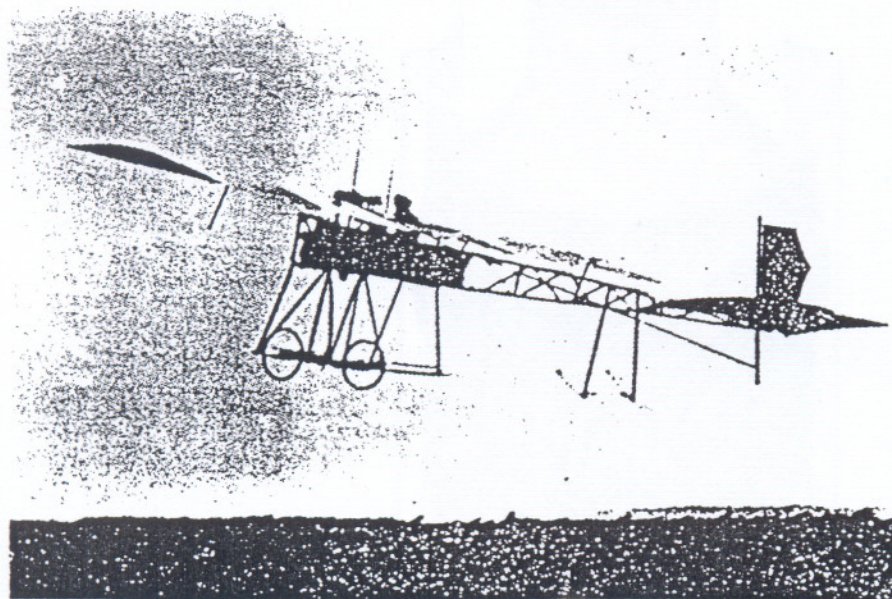




Rusjan, 1909  
(Vir: Sitar, 1989)  
EDA III ali IV

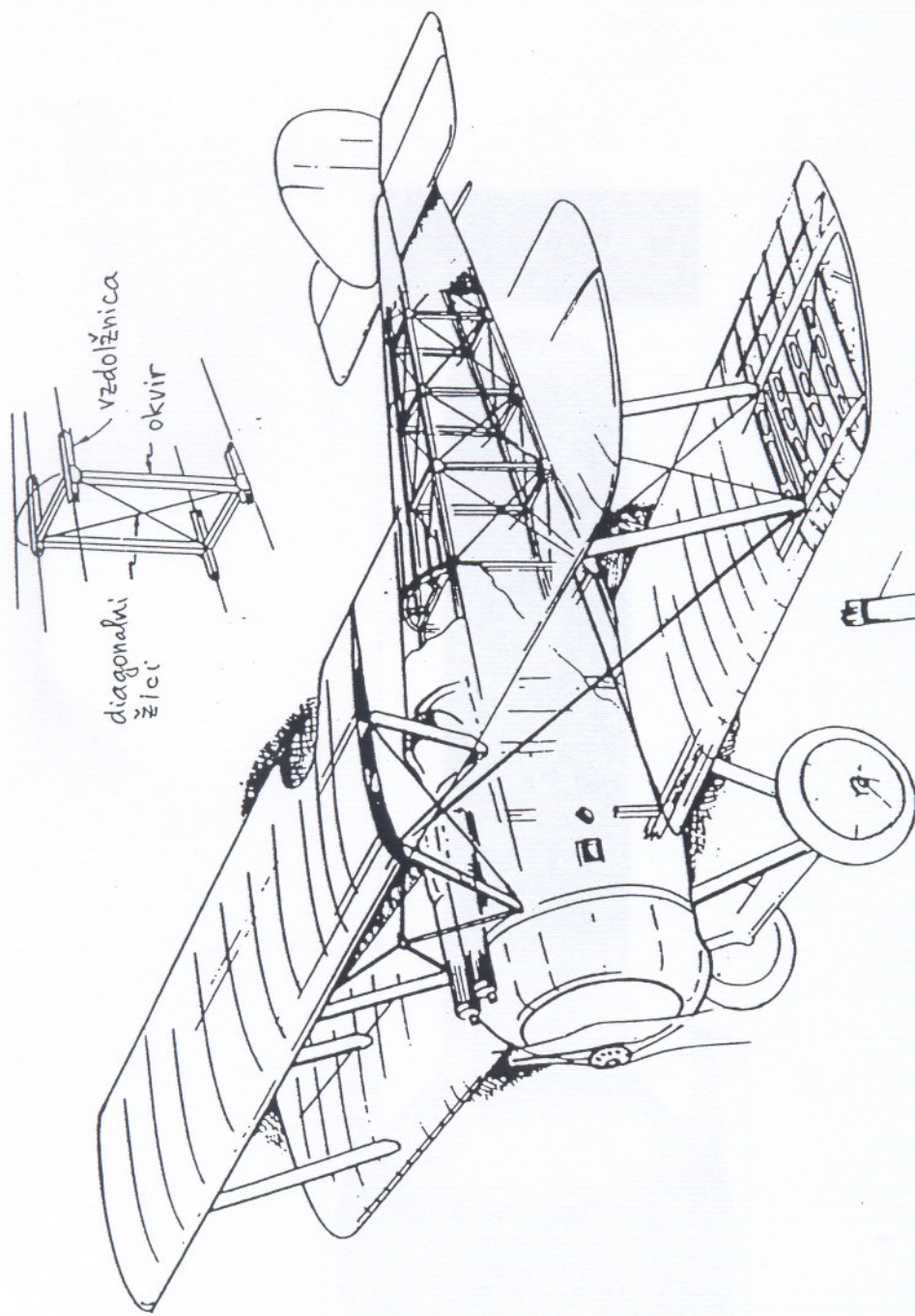


EDA V

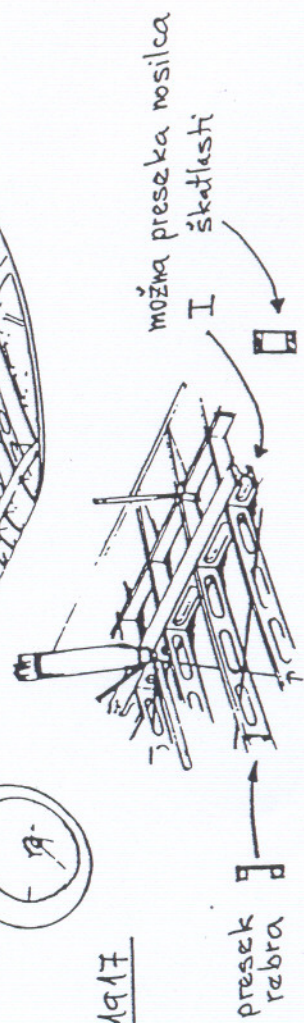


EDA VI





Letadlo Sopwith Camel, 1917  
 (Vir: Cutler, 1992)





### 3. Obdobje med obema vojnama

Letalstvo je med obema vojnama doživelo močan razvoj in se predvsem s prevozom potnikov in tovora uveljavilo kot nova gospodarska dejavnost, med drugo svetovno vojno pa tudi kot ključen vojaški potencial.

Ob koncu prve svetovne vojne sta se pojavili dve bistveni novosti v strukturi zasnove letal, to je:

- samonosno krilo z močnim nosilcem in nosilno oplato, ki ni več potrebovalo zunanjih vezi, in
- pollupinasti (semi monocoque) trup.

V obeh primerih nastopa oplata kot bistven nosilni element (stressed skin, z gledovanjem po barkah), ne pa zgolj kot aerodinamično prekritje.

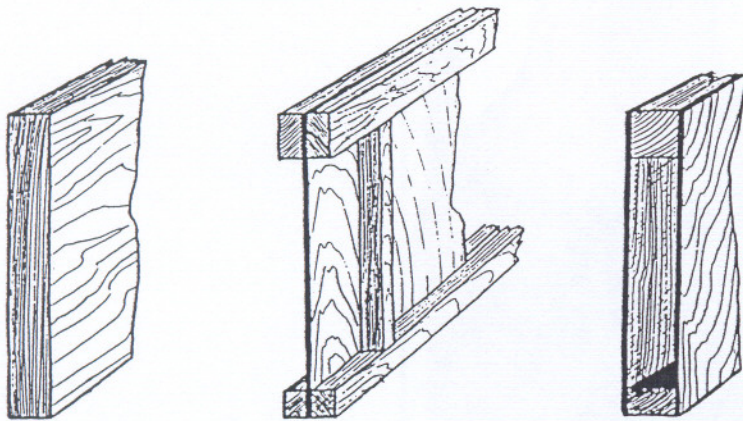
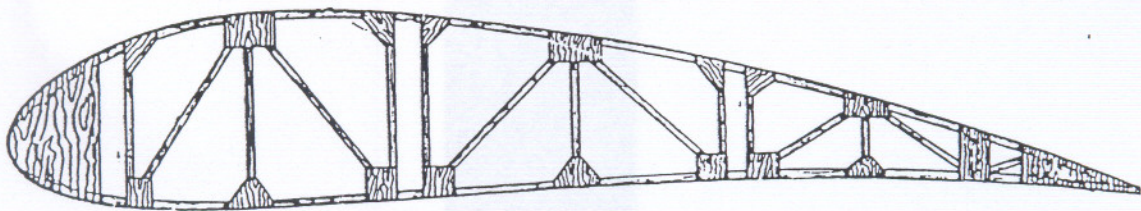
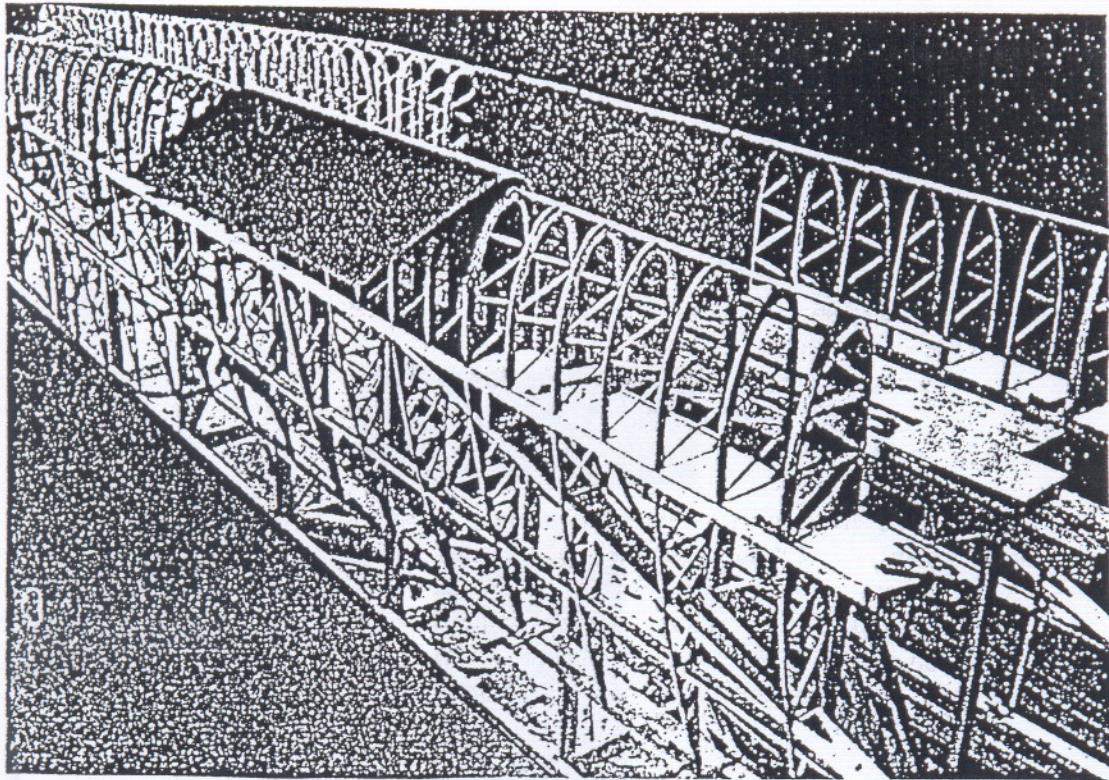
Nazoren primer samonosnega krila je letalo Fokker D. VIII iz leta 1918. Izdelavo oplate trupa iz furnirj, lepljenega v betonskem kalupu, pa sta leta 1918 v Ameriki patentirala predhodnika poznane tovarne letal Lockheed.

Druga pomembna sprememba v tem obdobju pa je postopno nadomeščanje lesa z aluminijevim zlitinam. Čeprav je še v drugi svetovni vojni letelo lesenih letal, je bila ta sprememba neizbežna. Ob vse večjih hitrostih in krilnih obtežbah les trdnostno ni več zadoščal, pojavili pa so se tudi komercialni zadržki, saj je postajalo pridobivanje kvalitetnega lesa vse dražje. Prvo povsem kovinsko letalo iz jekla in železa je bilo Junkers J – 1 iz 1915, pa tudi Fokkerjeva letala iz prve svetovne vojne so imeli že nosilno ogrodje trupa iz varjenih jeklenih cevi.

Karakteristike tipičnega letala tega obdobja so torej:

- Enokrilci s samonosnim krilom in podvozjem izpodrivajo dvokrilce
- Aluminij izpodriva les kot osnovno gradivo
- Uveljavi se standardna nosilna strukturalna zasnova (in terminologija zanjo):
  - pollupinasti trup sestavljajo okvirji, vzdolžnice in nosilna oplata,
  - samosnosno krilo sestavljajo nosilci (eden ali več), rebra, vzdolžnice in nosilna oplata.
- Računska pristopa k dimenzioniranju je vse več. Izračun bremen postaja vse bolj zanesljiv, nastajajo kriteriji (priporočila in predpisi), ki jim mora letalo ustrezati. Dimenzionira se predvsem na napetosti, manj na deformaciji.





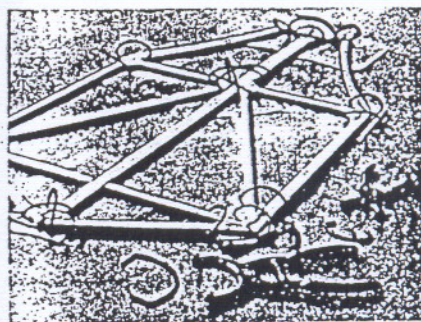
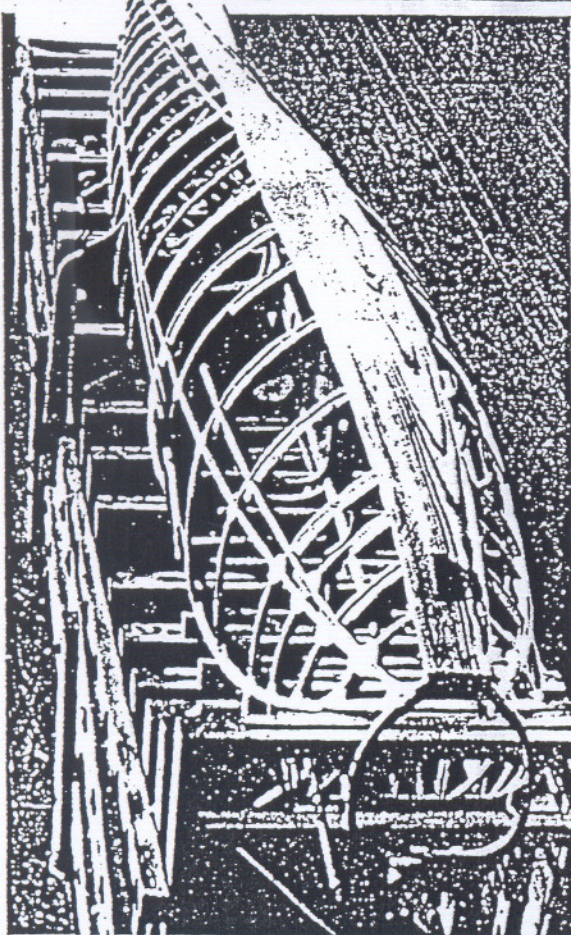
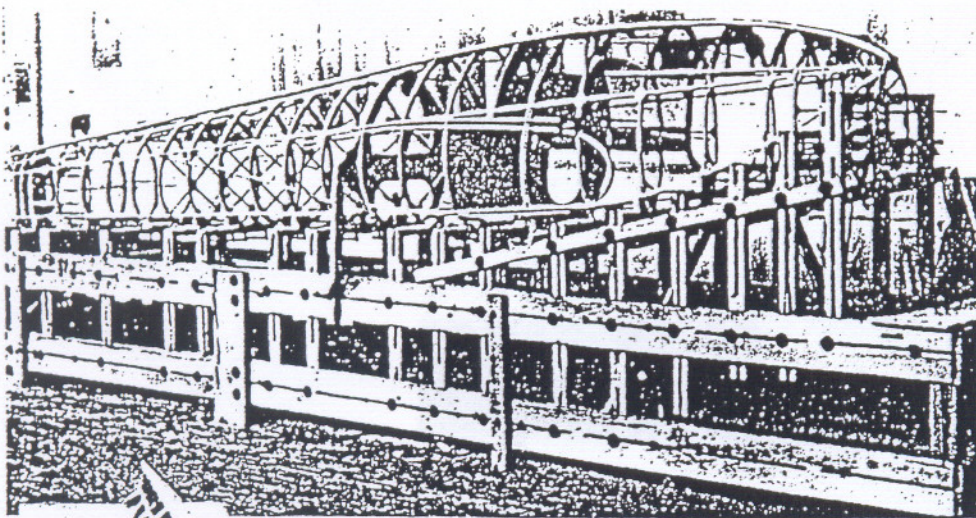
Zgoraj: Krilo z dvema nosilcema  
v mont. stojalu - "hellingu"

V sredini: Rebro krila -  
prekalčna konstrukcija

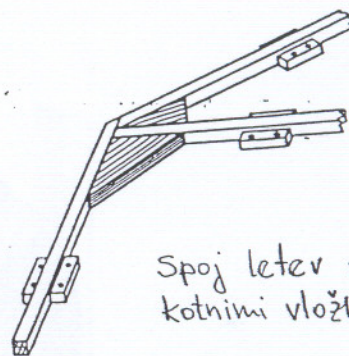
Levo: Nosilec krila  
- polkostenski  
- I nosilec  
- škatlasti nosilec

(Vir: Werkstatt Praxis 1989)





Izdelava rebra trupa

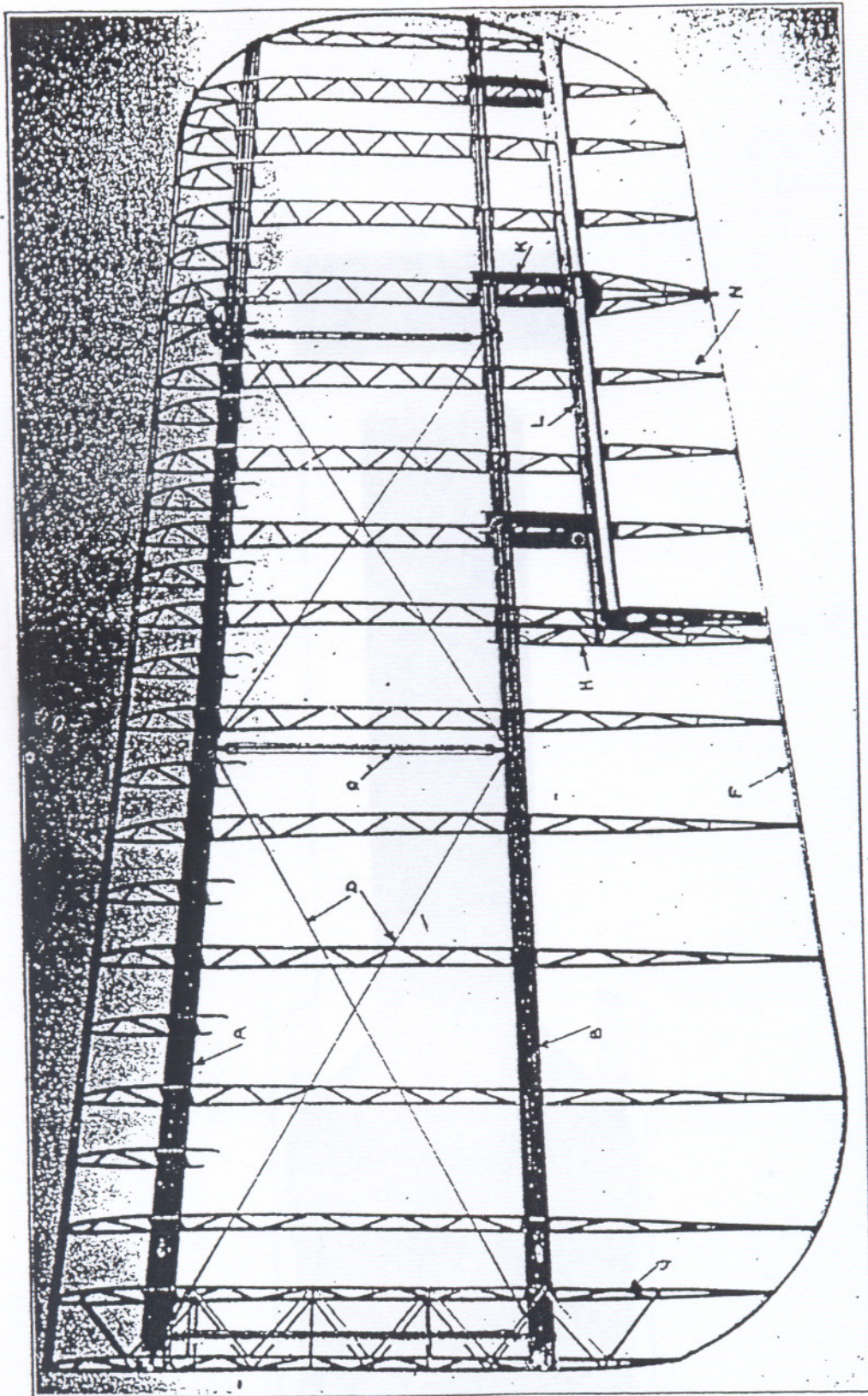


Spoj letev s kotnimi vložki

Trup v montažnem stojalu - "hellingu"

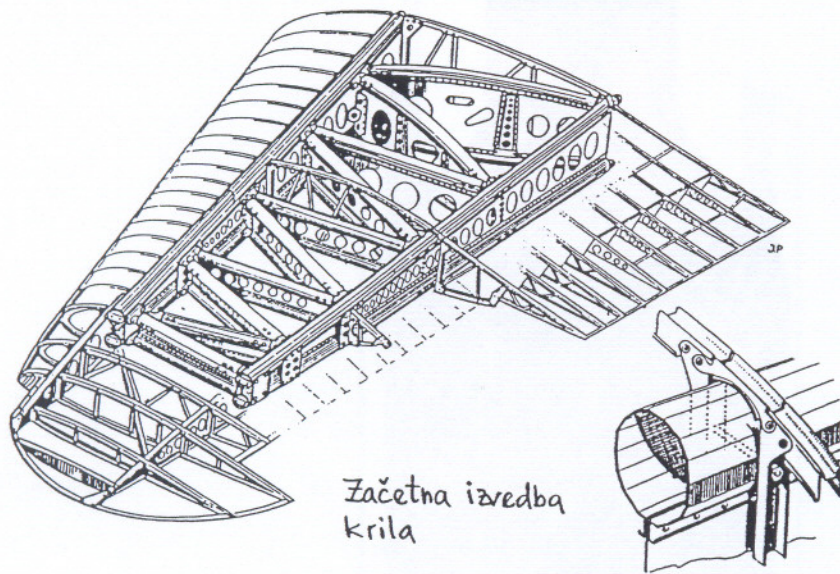
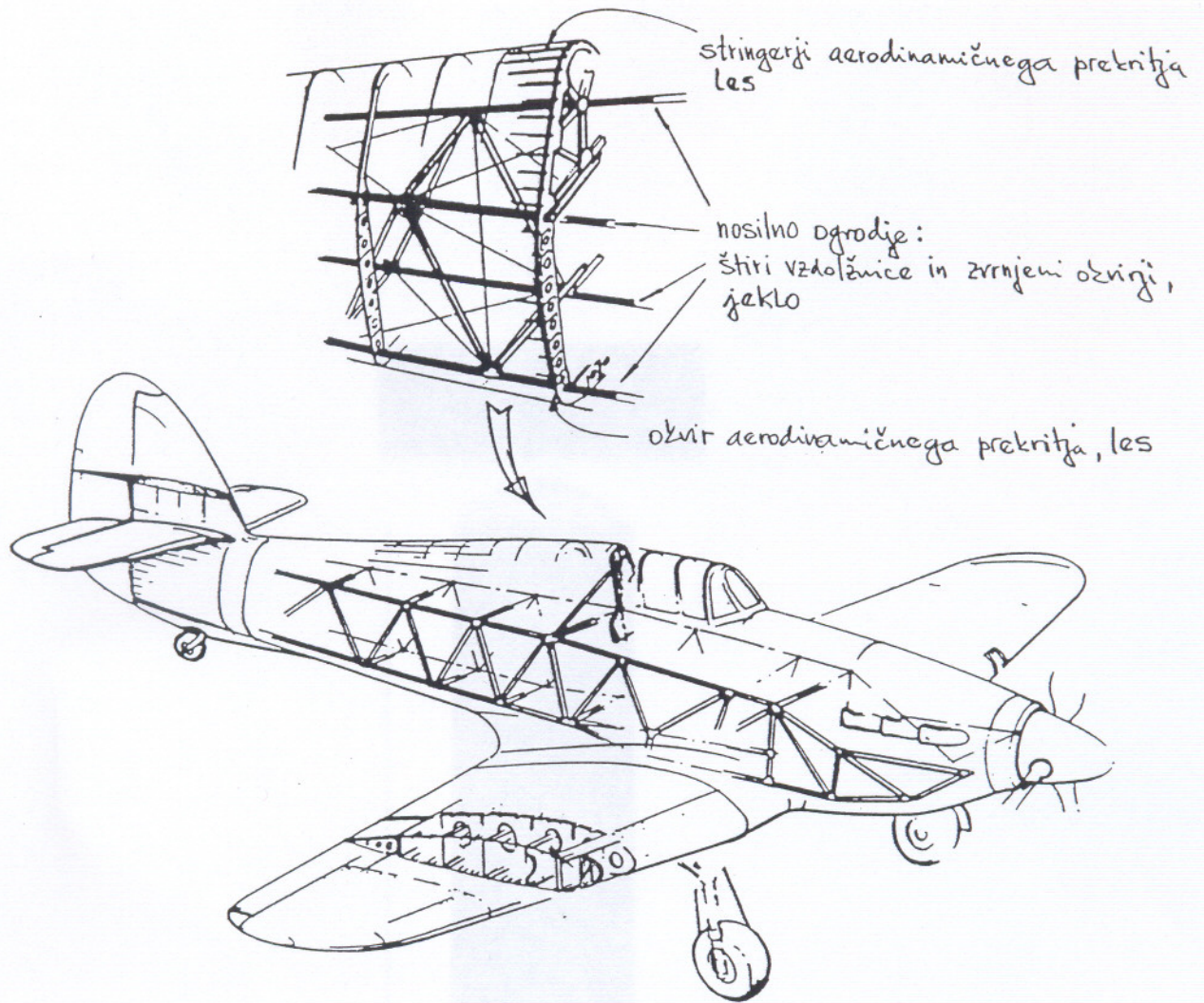
(Vir: Werkstätt Praxis, 1989)





Kovinsko krilo z dvema nosilcema, Bristol, začetna izvedba  
(Vir: ?)



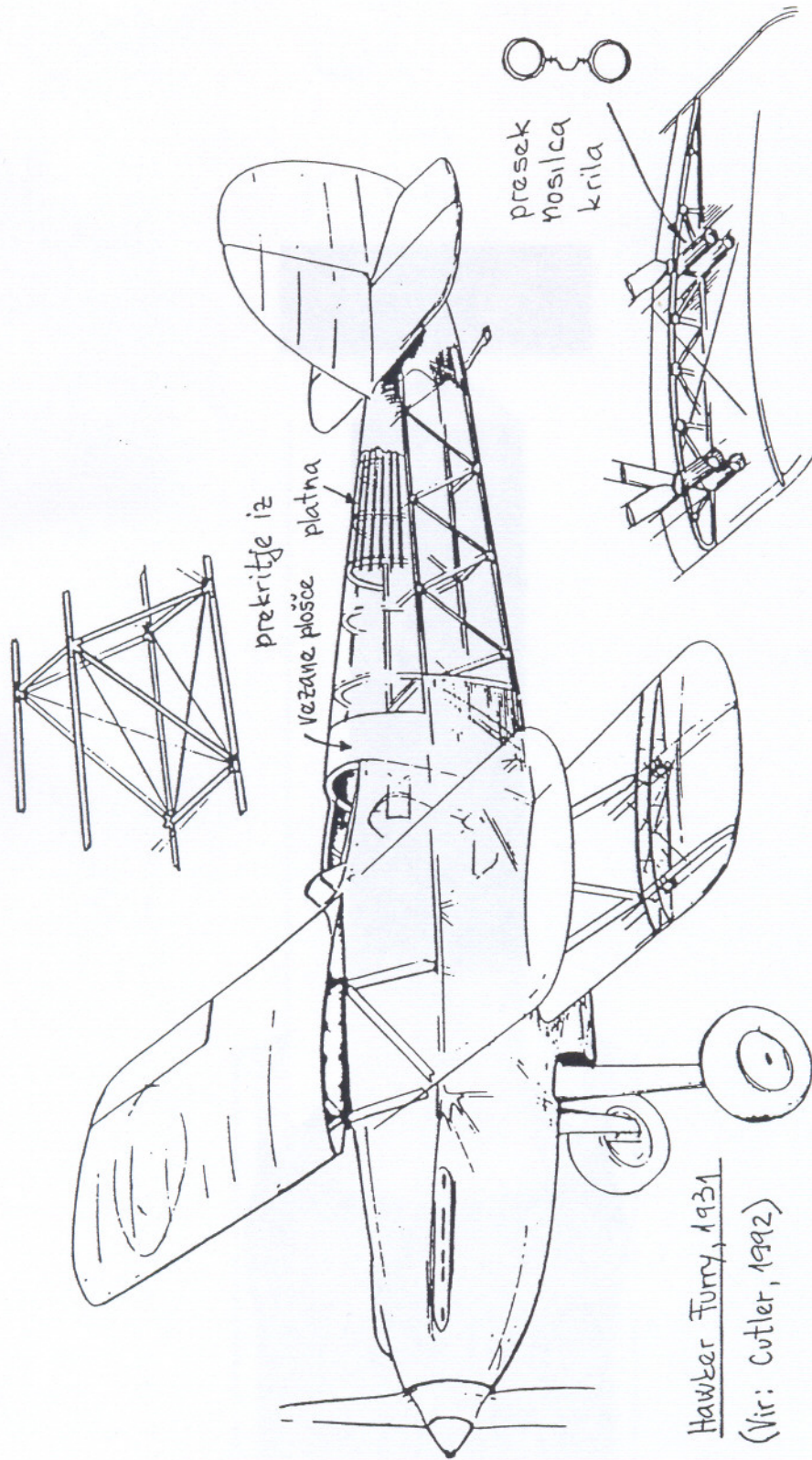


Začetna izredba krila

Hawker Hurricane, 1935

(Vir: Cotler, 1992)





Hawker Fury, 1931  
(Vir: Cutler, 1992)



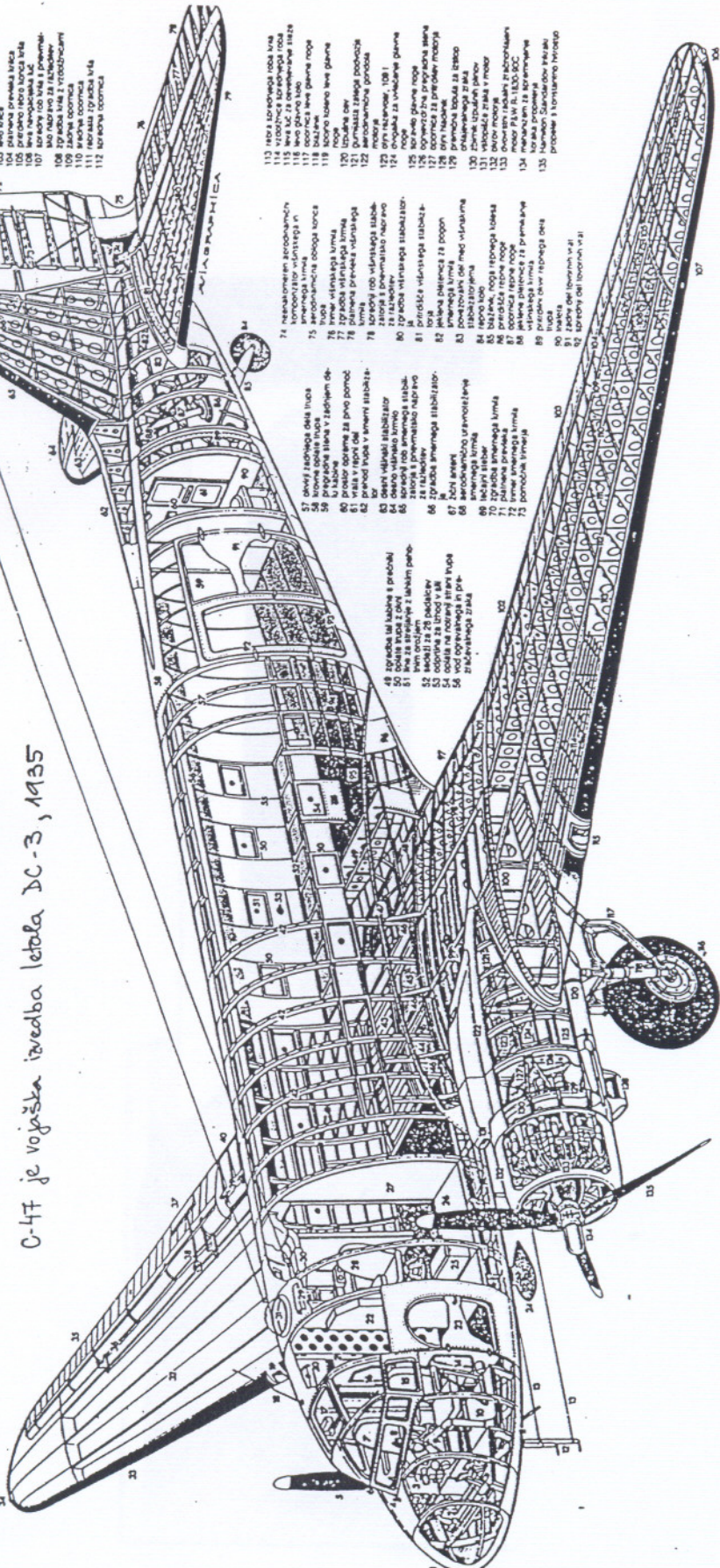
# Douglas C-47 dakota: delni prerez

- 1. uveljavljeni nosni potokov, odtokov
- 2. 20 instrumentov in lamp
- 3. komandna plošča
- 4. plošča z brojevalniki z raličniki
- 5. vrhna stacionarna črta
- 6. vertikalna stacionarna stena
- 7. kockov nosilni
- 8. nožica za pih
- 9. kormilo
- 10. kormilna plošča z raličniki
- 11. kormilna plošča z raličniki
- 12. kormilna plošča z raličniki
- 13. kormilna plošča z raličniki
- 14. raličniki
- 15. kormilna plošča z raličniki
- 16. kormilna plošča z raličniki
- 17. kormilna plošča z raličniki
- 18. kormilna plošča z raličniki
- 19. kormilna plošča z raličniki
- 20. raličniki

- 21. delni prijetni prostor
- 22. prostor za elektrone varovalke
- 23. prostor za potiskalce
- 24. vrhna ACF
- 25. prostor za raličnike
- 26. vrhna ACF
- 27. vrhna ACF
- 28. vrhna ACF
- 29. vrhna ACF
- 30. vrhna ACF
- 31. vrhna ACF
- 32. vrhna ACF
- 33. vrhna ACF
- 34. vrhna ACF
- 35. vrhna ACF
- 36. vrhna ACF
- 37. vrhna ACF
- 38. vrhna ACF
- 39. vrhna ACF
- 40. vrhna ACF

- 41. zgradba kupa z opornicami in
- 42. delni prijetni prostor
- 43. vrhna ACF
- 44. vrhna ACF
- 45. vrhna ACF
- 46. vrhna ACF
- 47. vrhna ACF
- 48. vrhna ACF
- 49. vrhna ACF
- 50. vrhna ACF
- 51. vrhna ACF
- 52. vrhna ACF
- 53. vrhna ACF
- 54. vrhna ACF
- 55. vrhna ACF
- 56. vrhna ACF
- 57. vrhna ACF
- 58. vrhna ACF
- 59. vrhna ACF
- 60. vrhna ACF

C-47 je vojška izvedba letala DC-3, 1935



- 61. vrhna ACF
- 62. vrhna ACF
- 63. vrhna ACF
- 64. vrhna ACF
- 65. vrhna ACF
- 66. vrhna ACF
- 67. vrhna ACF
- 68. vrhna ACF
- 69. vrhna ACF
- 70. vrhna ACF
- 71. vrhna ACF
- 72. vrhna ACF
- 73. vrhna ACF
- 74. vrhna ACF
- 75. vrhna ACF
- 76. vrhna ACF
- 77. vrhna ACF
- 78. vrhna ACF
- 79. vrhna ACF
- 80. vrhna ACF

- 81. vrhna ACF
- 82. vrhna ACF
- 83. vrhna ACF
- 84. vrhna ACF
- 85. vrhna ACF
- 86. vrhna ACF
- 87. vrhna ACF
- 88. vrhna ACF
- 89. vrhna ACF
- 90. vrhna ACF
- 91. vrhna ACF
- 92. vrhna ACF
- 93. vrhna ACF
- 94. vrhna ACF
- 95. vrhna ACF
- 96. vrhna ACF
- 97. vrhna ACF
- 98. vrhna ACF
- 99. vrhna ACF
- 100. vrhna ACF

- 101. vrhna ACF
- 102. vrhna ACF
- 103. vrhna ACF
- 104. vrhna ACF
- 105. vrhna ACF
- 106. vrhna ACF
- 107. vrhna ACF
- 108. vrhna ACF
- 109. vrhna ACF
- 110. vrhna ACF
- 111. vrhna ACF
- 112. vrhna ACF
- 113. vrhna ACF
- 114. vrhna ACF
- 115. vrhna ACF
- 116. vrhna ACF
- 117. vrhna ACF
- 118. vrhna ACF
- 119. vrhna ACF
- 120. vrhna ACF

- 121. vrhna ACF
- 122. vrhna ACF
- 123. vrhna ACF
- 124. vrhna ACF
- 125. vrhna ACF
- 126. vrhna ACF
- 127. vrhna ACF
- 128. vrhna ACF
- 129. vrhna ACF
- 130. vrhna ACF
- 131. vrhna ACF
- 132. vrhna ACF
- 133. vrhna ACF
- 134. vrhna ACF
- 135. vrhna ACF

© Pilot Press Limited

(Vir: revija Krila)



#### 4. Obdobje po drugi svetovni vojni

Obdobje po drugi svetovni vojni je zaznamoval še bolj silovit razvoj letalsva kot med vojnama. Najmočnejši impulz je nastopil takoj po koncu vojne z reakcijskim motorjem. Nadaljni razvoj vojaškega letalstva je nato narekovala oboroževalna tekma vse do konca osemdesetih let, civilno letalstvo pa je cvetelo na rastočem trgu prevoza oseb in blaga vse do naftne krize sedemdesetih let. Nastajala so vedno večja in hitrejša letala.

Pollupinasta struktura je postopno zorela glede dimenzioniranja – optimiranja mase, konstrukcije in tehnologije izdelave ter se uveljavila kot optimalna struktura v letalogradnji. Nakopičilo se je ogromno izkušenj, zaradi česar so novi projekti manj rizični kot nekoč.

Vendar je pot do obstoječega stanja tehnike vodila najprej do neprijetnega soočenja z utrujanjem materiala, še posebej izrazito in boleče je bilo pri letalu Comet leta 1954. V petdesetih in šestdesetih letih je bilo nato vloženo ogromno truda, teoretičnih raziskav in testiranj, da bi obvladali utrujanje. Uvedba konceptov »safe life«, fail safe« in nedavno še »damage tolerance«.

Trdnostna in togostna analiza letalskih struktur je bila do šestdesetih let izjemno obsežno in zamudno ročno delo. Številne metode za statično nedoločene strukture so bile razvite prav zaradi potreb v letalstvu. Z nastopom računalnikov je strukturna analiza pridobila na hitrosti, moči in zanesljivosti, analiza z metodo končnih elementov je postala standard. Sodobne letalske strukture so tako zasnovane, preračunane in testirane na:

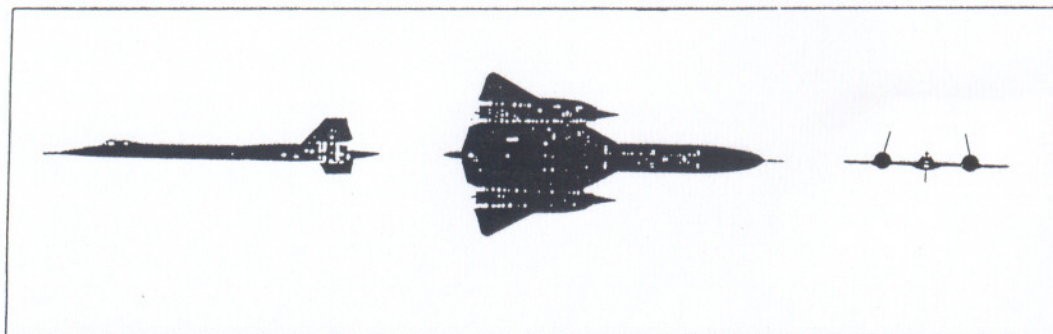
- statično porušno trdnost oziroma mejo elastičnosti,
- dopustne deformacije, aeroelastičnost
- dinamično trdnost in utrujanje materiala, to je nastanek in rast razpok ter preostalo statično trdnost

Pomemben impulz pa so v zadnjih tridesetih letih prispevali tudi kompoziti.

##### Karakteristike tipičnega letala tega obdobja:

- Pollupinast trup (okvirji, vzdolžnice in oplata), osrednji del trupa je dimenzioniran tudi kot tlačna posoda.
- Samonosno krilo (eden ali več nosilcev, rebra, vzdolžnice, oplata).
- uvlačljivo podvozje.
- Osnovno gradivo so aluminijeve zlitine, predvsem 2024 in 7075, osnovna tehnologija spajanja posameznih elementov pa kovičenje in vijačenje.
- Snovanje in analiza strukture je postalo standardno inženirsko delo, ki vključuje zasnovo, analizo mehanskega modela na napetosti in deformacije, podrobno konstruiranje, izdelavo prototipa, testiranje in izdajo navodil za vzdrževanje in preglede.
- Predpisi v letalogradnji so se ves čas izpopolnjevali, sedaj že poteka proces poenotenja predpisov med posameznimi državami.





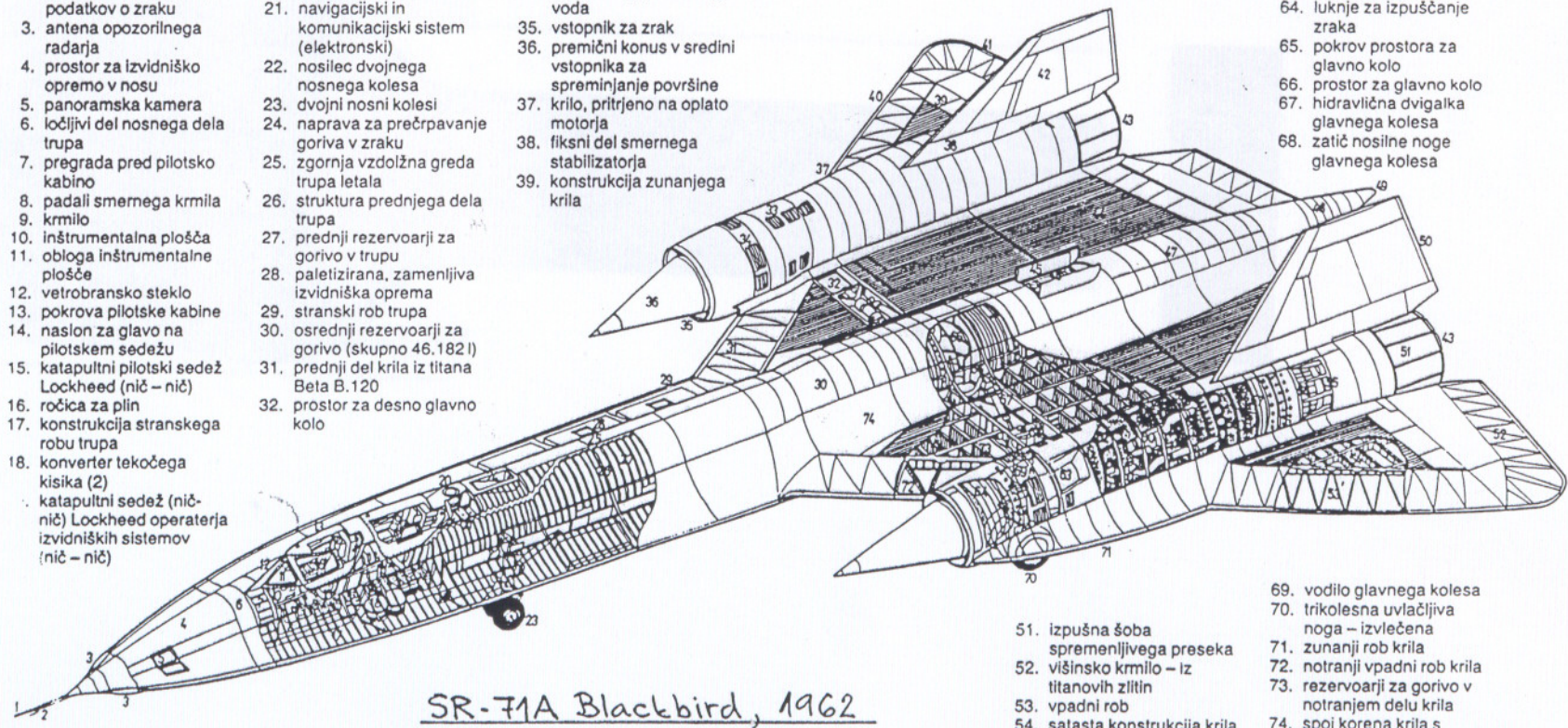
1. Pitotova cev
2. senzor za pridobivanje podatkov o zraku
3. antena opozorilnega radarja
4. prostor za izvidniško opremo v nosu
5. panoramska kamera
6. ločljivi del nosnega dela trupa
7. pregrada pred pilotsko kabino
8. padali smernega krmila
9. krmilo
10. instrumentalna plošča
11. obloga instrumentalne plošče
12. vetrobransko steklo
13. pokrova pilotske kabine
14. naslon za glavo na pilotskem sedežu
15. katapultni pilotski sedež Lockheed (nič – nič)
16. ročica za plin
17. konstrukcija stranskega robu trupa
18. konverter tekočega kisika (2)
19. katapultni sedež (nič – nič) Lockheed operaterja izvidniških sistemov (nič – nič)

20. naprava za astro navigacijo
21. navigacijski in komunikacijski sistem (elektronski)
22. nosilec dvojnega nosnega kolesa
23. dvojni nosni kolesi
24. naprava za prečrpavanje goriva v zraku
25. zgornja vzdolžna greda trupa letala
26. struktura prednjega dela trupa
27. prednji rezervoarji za gorivo v trupu paletizirana, zamenljiva izvidniška oprema
28. stranski rob trupa
29. osrednji rezervoarji za gorivo (skupno 46.182 l)
30. prednji del krila iz titana Beta B.120
31. prostor za desno glavno kolo

33. dovodne reže za zrak
34. reže sekcije pretočnega voda
35. vstopnik za zrak
36. premični konus v sredini vstopnika za spreminjanje površine krilo, pritrjeno na oplato motorja
37. fiksni del smernega stabilizatorja
38. konstrukcija zunanjega krila

40. usločen vpadni rob
41. desno višinsko krmilo
42. premični vertikalni stabilizator
43. izpušna šoba spremenljivega preseka
44. krilni rezervoarji za gorivo
45. vratica prostora za zaviralno padalo (odprta)
46. zaviralno padalo
47. rezervoarji za gorivo v repnem delu
48. repni konus
49. odprtina za gorivo
50. premični vertikalni stabilizator – levi

55. komora motorja za dodatno zgorevanje
56. izpušna šoba komore za dodatno zgorevanje
57. trisopenjske škrge motorja
58. razdelilnik goriva komore za dodatno zgorevanje
59. lopatice kompresorja obtočnega dela motorja
60. vstopnik v obtočni del motorja
61. vzporedna oprema motorja
62. turbo stato reakcijski motor Pand W JT11D-208 (J5B)
63. difuzna komora
64. luknje za izpuščanje zraka
65. pokrov prostora za glavno kolo
66. prostor za glavno kolo
67. hidravlična dvigalka glavnega kolesa
68. zatič nosilne noge glavnega kolesa



51. izpušna šoba spremenljivega preseka
52. višinsko krmilo – iz titanovih zlitin
53. vpadni rob
54. satasta konstrukcija krila iz titana

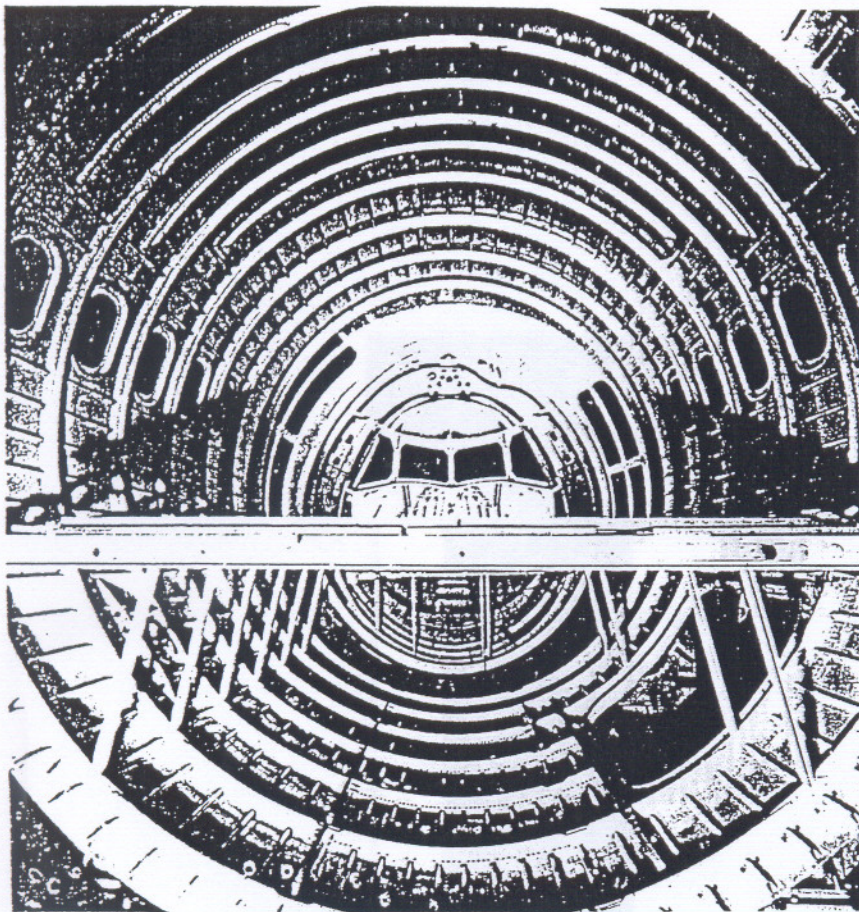
69. vodilo glavnega kolesa
70. trikolesna uvlačljiva noga – izvlečena
71. zunanji vpadni rob krila
72. notranji vpadni rob krila
73. rezervoarji za gorivo v notranjem delu krila
74. spoj korena krila s trupom

SR-71A Blackbird, 1962  
(Vir: revija Krila)

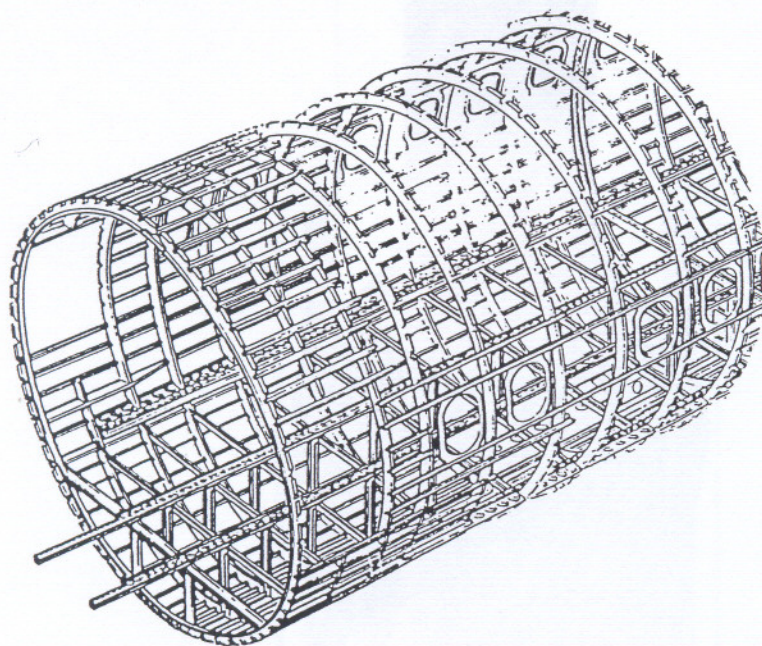








Notranjost trupa,  
pogled proti nosu

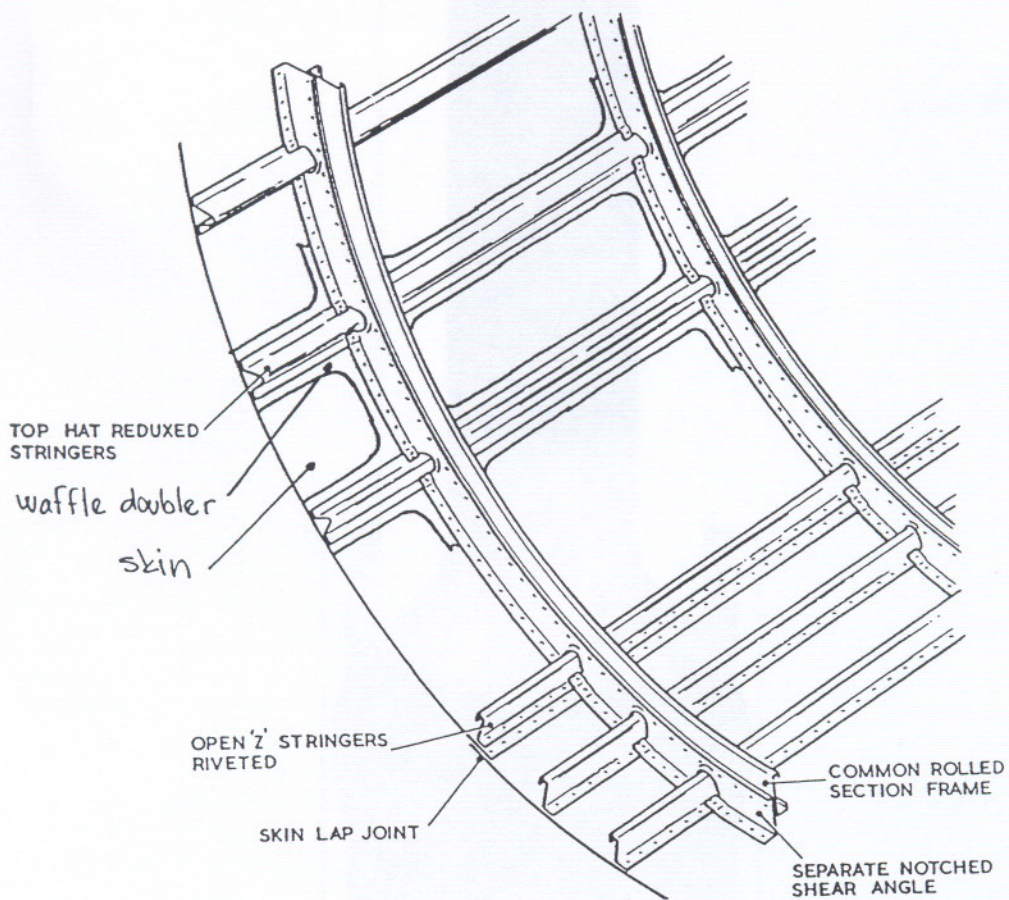
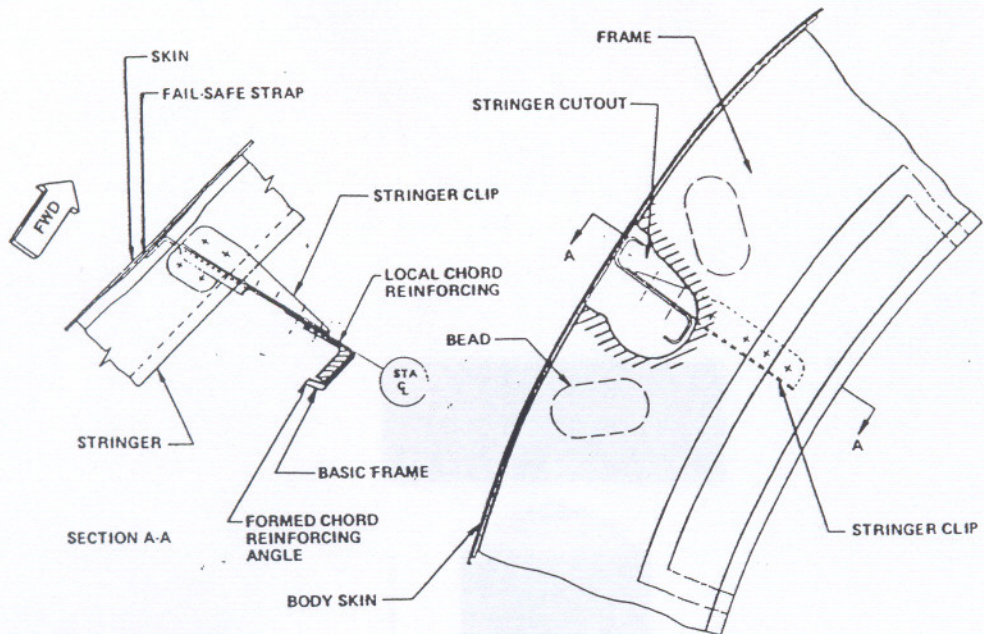


Segment trupa  
brez oplata

Trup sodobnega  
potniškega letala

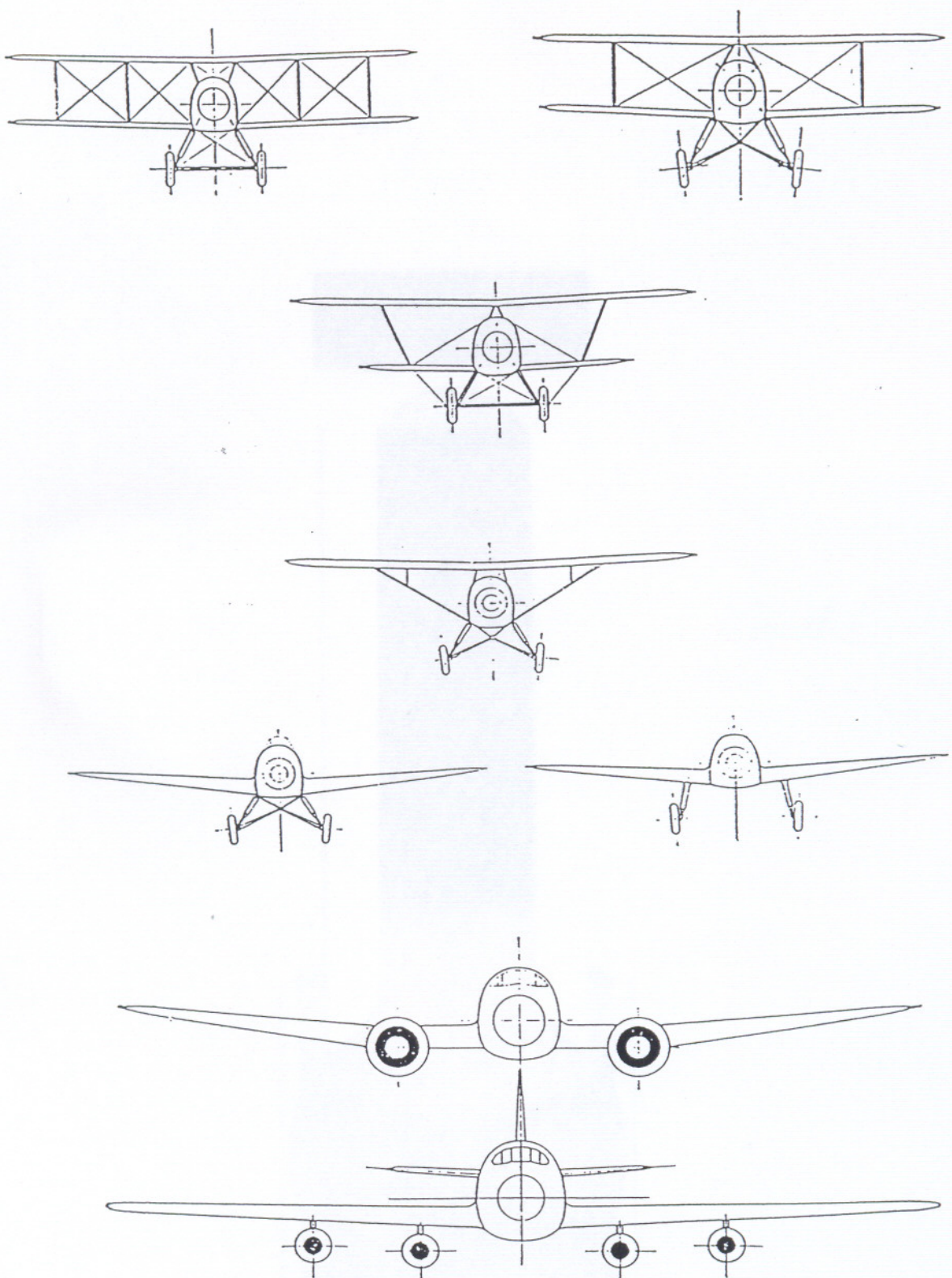
(Vir: Cutler, 1992)





Trup sodobnega potniškega letala - podrobnosti  
 (Vir: Cutler, 1992)





Vpliv zmanjševanja čelnega preseka na strukturo (Vir: ?  
 Aerodinamična optimizacija čelnega preseka letal je  
 terjala od strukturnih inženirjev vedno nove rešitve.



## 5 Pogled naprej

- Ogromno nakopičenega znanja in izkušenj o strukturah zagotavlja novim projektom manj rizičnosti. Airbusov »mega« projek A-380 naj bi torej ne bil več toliko tehnični, ampak bolj organizacijski in podjetniški podvig. Vendar brez novosti ne gre: stingerji ne bodo kovičeni, pač pa varjeni na oplato trupa. Tudi osnovni gradbeni material bo nova Aluminijeva zlitina.
- Po napovedih bodo kompoziti vse bolj prisotni tudi v primarni strukturi, Boeing že testir celotno upogibno-torzijsko škatlo iz kompozita epoksi/ogljik, lepilni spoji so dodatno varovani s prešitjem s kevlarso nitko.
- V okviru nadzvočnih civilnih in vojaških projektov se razvijajo materiali za hitrost Mach 2 – 5.
- Tudi stealth tehnologija terja specialne materiale, ki poleg noailnosti tudi vpijajo radarske žarke.
- Razvoj prilagodljivih (adaptivnih) struktur je šele na začetku
- Povsem nov iziv za strukturne inženirje je tudi optimizacija strukture in posameznih elementov na stroške izdelave in vzdrževanja ter večnamenskosti, Joint Strike Fighter.