

stajalištima. Kad naplatu obavlja vozač, štedi se na izdacima za osobni dohodak konduktera, ali se produljuje stajanje na stajalištima uz slabije iskorištenje voznog parka i povećanje potroška pogonskog goriva. Osim toga, vozač je stalno radno aktivan, što smanjuje sigurnost u prometu. Na prijelazu u šezdesete godine ovoga stoljeća započelo je ukidanje radnog mjesta konduktera u vozilima javnoga gradskog prometa. Konduktera je zamijenio vozač, automatizirana naplata i sve više pretplatnih i pokaznih karata.

Djelomično automatizirana naplata provodi se a) pomoću kutije za sakupljanje vozarine, b) pomoću uređaja za ubacivanje metalnog novca i izdavanje voznih karata i c) pomoću uređaja za poništavanje pretplatnih voznih karata koje vrijede za više vožnja.

Naplata pomoću kutije za sakupljanje novca ili žetona najjednostavniji je oblik djelomično automatizirane naplate. Taj se oblik primjenjuje kad je vozač preuzeo posao konduktera. Tada se u blizini vozača postavlja kutija s prozirnim gornjim dijelom u koju putnici ubacuju novac ili žetone, a vozač nadgleda to ubacivanje i propušta putnike. Vozne se karte ne izdaju. Taj je oblik naplate moguć kad postoje jedinstvena tarifa i pretplatne karte. Vozač obično ne uzvraća višak uplaćenog iznosa, pa se od putnika traži da uplaćuju točan iznos vozarine, što je nekad omogućeno postojanjem posebnih žetona. Sve to omogućuje brži ulazak putnika, koji mogu ulaziti samo na vrata pokraj vozača, dok sva ostala vrata služe za izlaz putnika.

Naplata pomoću uređaja za ubacivanje metalnog novca i izdavanje voznih karata tehnički je složeniji oblik naplate. Putnicima se razlika uplaćenog iznosa može vratiti obično na temelju potvrde koja se unovčuje na terminalima. Takvim je oblikom naplate olakšana kontrola putnika i vozača, a moguća je i primjena relacijskih tarifa i tarifa u kojima se razlikuju korisničke skupine (npr. djeca od odraslih).

Uređaji za poništavanje pretplatnih karata omogućuju iskorištavanje prednosti prodaje voznih karata izvan vozila i njihovo poništavanje u vozilu, eliminirajući tako rad vozača. Takvi su uređaji pogodni kad postoji jedinstvena tarifa. Omogućuje ulazak putnika na više ulaza, ali i ometanje izlaska putnika. I takav je sustav uspješniji kad istodobno postoje pretplatne karte.

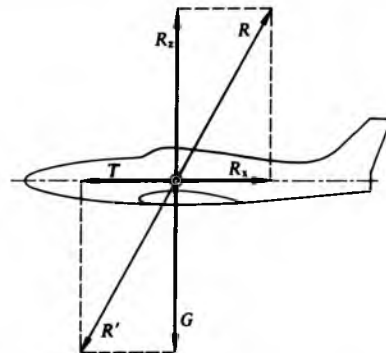
Potpuno automatizirana naplata omogućuje automatsku kontrolu putnika pri ulasku u vozilo. Da bi se omogućila kontrola, postoje uređaji za detekciju putnika i karata, za otvaranje i zatvaranje prolaza putnika. Kontrolni uređaj može biti zatvoren, kad za svakog putnika postoji prepreka, i otvoren, koji postavlja prepreku tek kad putnik nema karte ili kad je ona neispravna. Uz taj kontrolni uređaj postoji uređaj za ubacivanje novca ili žetona koji nakon ubacivanja izdaje kartu, uređaj za poništavanje unaprijed kupljenih karata i uređaj za magnetsku i elektroničku kontrolu karata. Ta je kontrola potrebna pogotovo ako postoji relacijska vozarina i provodi se pri ulasku i pri izlasku putnika. Za takvu primjenu postoje dvije vrste pretplatnih voznih karata: jedna koja glasi na duljinu putovanja i druga koja glasi na uplaćeni iznos. Upotrebom takve karte otpisuje se duljina izvršenog putovanja, odnosno iznos vozarine. Uređaji su za potpuno automatiziranu naplatu skupi i komplicirano je njihovo održavanje. Takvi uređaji omogućuju prikupljanje točnih podataka o broju putnika na pojedinim linijama i u pojedinim vremenskim razdobljima, što omogućuje bolju organizaciju prometa i ekonomičniju eksploataciju vozila.

LIT.: H. R. Neigelt, R. E. Götz, H. H. Weiss, Stadtverkehr der Zukunft. Alba Buchverlag, Düsseldorf 1973. - T. McPean, Urban Transportation Technology. Lexington Books, Lexington-Toronto-London 1976. - J. M. Tomson, Greats Cities and their Traffic. Victor Gollanez, London 1977. - P. Tacheo, Spostamenti nella città. Officina Edizioni, Roma 1978. - R. Banković, Javni gradski saobraćaj. Naučna knjiga, Beograd 1978. - V. R. Vuchic, Urban Public Transportation. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1981.

PRORAČUN I DIMENZIONIRANJE ELEMENATA AVIONA provodi se na temelju opterećenja konstrukcije aviona koja djeluju u letu, tokom polijetanja i slijetanja, te za vrijeme vožnje po tlu ili vodi.

Ta opterećenja aviona, odnosno naprezanja njegovih elemenata, ovise o nekoliko faktora kao npr. o aerodinamičkim i konstrukcijskim karakteristikama aviona, njegovoj namjeni, vremenskim uvjetima i načinu (tehnicu) pilotiranja, tj. o brzini pokreta komandi leta.

Preopterećenje konstrukcije. Vrijednosti koje se uzimaju kao osnova za proračun čvrstoće i krutosti elemenata aviona ovise o preopterećenjima tih elemenata, koja nastaju zbog neustaljenog kretanja aviona pri promjeni smjera ili brzine.



Sl. 1. Sile koje djeluju na avion u jednolikom horizontalnom letu kroz mirnu atmosferu

Za vrijeme ustaljenog gibanja u horizontalnom letu u mirnoj atmosferi i s konstantnim režimom rada motora na avion djeluju četiri osnovne sile koje su u stanju ravnoteže: sila uzgona R_z , sila gravitacije G , sila otpora R_x i vučna ili potisna sila T . Prema sl. 1 između tih sila postoje odnosi

$$R_z = G \quad \text{i} \quad R_x = T. \quad (1)$$

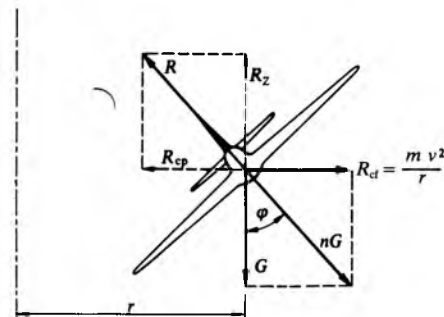
Ako avion iz ustaljenoga horizontalnog leta, kad je $R_z = G$, promijeni smjer gibanja, na avion će osim navedenih sila djelovati i centrifugalna sila $R_{cf} = m v^2 / r$, gdje je m masa aviona, v brzina po trajektoriji, r polumjer zaokreta. Prema sl. 2 u ustaljenom gibanju po kružnoj trajektoriji sila R , koja je rezultat sila R_z i R_{cp} , mora biti u ravnoteži sa silom nG koja je rezultat sile gravitacije G i centrifugalne sile R_{cf} . Budući da je $R = nG$, to je

$$n = \frac{R}{G}. \quad (2)$$

Ta se veličina može izraziti i kao funkcija kuta nagiba, te je

$$nG = \frac{G}{\cos \varphi}, \quad (3)$$

pa je nG uvijek veće od G jer je $n > 1$.



Sl. 2. Sile koje djeluju na avion pri ustaljenom gibanju po kružnoj trajektoriji

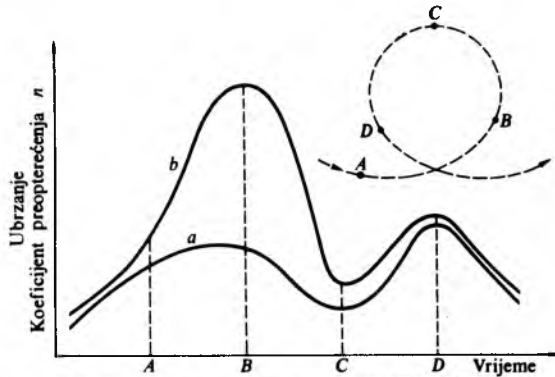
Koeficijent n naziva se *koeficijentom preopterećenja* i pokazuje koliko je puta sila što u zaokretu djeluje na svaki element aviona veća od sile gravitacije G u ustaljenom

horizontalnom letu. To se odnosi i na svaku drugu promjenu smjera gibanja ili brzine aviona, koja se naziva evolucijom, te je opći oblik izraza (3)

$$n = \frac{P}{G}, \quad (4)$$

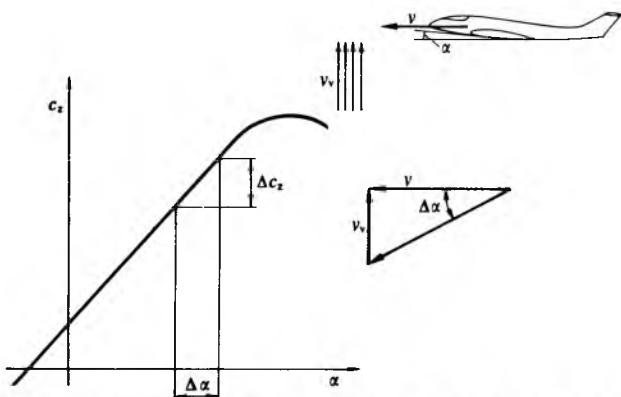
gdje je P opterećenje koje djeluje na element aviona pri spomenutoj promjeni, a G masa toga elementa.

Što su promjene smjera gibanja aviona brže, odnosno što je polumjer zakrivljenosti trajektorije manji, to će koeficijent preopterećenja n biti veći. Na sl. 3 prikazana su dva akcelerograma tokom izvođenja petlje (lupinga). Krivulja a prikazuje ubrzanje kad se petlja izvodi s velikim polumjerom trajektorije i blagim pokretima kormila visine, a krivulja b kad se petlja izvodi s manjim polumjerom i naglijim pokretima.



Sl. 3. Akcelerogrami aviona pri izvođenju petlje

Na preopterećenje u letu utječu i vanjski faktori. Tako zbog vertikalnih strujanja zraka (npr. iznad nejednolike zagrijanog tla ili u olujnoj fronti) na avion i u stacionarnom horizontalnom letu mogu djelovati velika preopterećenja (tzv. aerodinamički udar). Utjecaj ulaska aviona u takva vertikalna strujanja vidi se na sl. 4. Ako avion leti u mirnoj atmosferi stalnom brzinom v i s napadnim kutom krila α , te uleti u usponsko strujanje vertikalne brzine v_v , povećat će se napadni kut krila α za $\Delta\alpha$ djelovanjem vertikalne komponente. Zbog toga se naglo poveća i koeficijent uzgona c_z (v. *Aerodinamička sila*, TE 1, str. 10) za Δc_z uz proporcionalno povećanje uzgona krila. Kako avion može da uleti u takvo strujanje pri izvođenju neke evolucije koja je već uzrokovala preopterećenje krila, to se opterećenja zbrajaju i mogu da dostignu kritične vrijednosti. Zato je takvo kombinirano opterećenje, prema nekim propisima, jedan od osnovnih kriterija za dimenzioniranje krila.



Sl. 4. Utjecaj usponske vertikalne zračne struje na uzgon i napadni kut krila

Zbog sigurnosti propisi zahtijevaju da se koeficijent preopterećenja n poveća za tzv. koeficijent sigurnosti j (naziva se i koeficijentom loma), pa je

$$P_{\text{loma}} \cong jnG. \quad (5)$$

Prema tome lom nekog dijela aviona smije nastati tek pri preopterećenju koje je za koeficijent j veće od maksimalnog koeficijenta preopterećenja n . Vrijednost koeficijenta sigurnosti prema propisima iznosi 1,5...2.

Tokom leta, odnosno evolucijâ, svi dijelovi aviona nisu jednako opterećeni. Npr., u letu je stajni trap neopterećen, a u momentu slijetanja mora izdržati puno opterećenje. Maksimalno opterećenje jednog dijela aviona, naime, vremenski se ne podudara s maksimalnim opterećenjem drugih dijelova. Da bi se postigla potrebna sigurnost, mora svaki dio aviona izdržati najveće preopterećenje koje se za taj dio pojavljuje u najnepovoljnijim okolnostima.

Kritični slučajevi opterećenja svakog dijela aviona (krilo, trup, repne površine, okovi, stajni trap i dr.) sadržani su u propisima (v. *Opterećenje aviona*, TE 9, str. 625).

U svim industrijski razvijenijim zemljama postoje propisi za određivanje naprezanja u avionskim konstrukcijama. U tim propisima navedeni su slučajevi leta na osnovi kojih se određuju maksimalna moguća opterećenja uz propisane koeficijente preopterećenja n i sigurnosti j . U propisima nekih zemalja avioni su svrstani prema kategorijama namjene i grupama čvrstoće, dok se drugim propisima razvrstavaju prema masi aviona, brzini, opterećenju krila, opterećenju motora i sl.

U prvo su vrijeme propisi bili prilično shematizirani, pojednostavnjeni i postavljeni na empirijskim osnovama, te su među njima postojale znatne razlike. Danas, na osnovi mnogobrojnih iskustava, eksperimenata i teorijskih radova propisi su usavršeni, doduše postali su i mnogo kompleksniji, ali je pouzdanost rezultata proračuna sve veća. Opaža se tendencija unifikacije propisa, tako da se vrlo često, bar što se tiče aviona civilne namjene, propisi pojedinih zemalja priznaju i u drugim zemljama.

KRILO

Prema propisima razmatra se pet osnovnih slučajeva opterećenja krila.

Opterećenje A_k pojavljuje se pri krivolinijskom letu s napadnim kutom α kad koeficijent uzgona poprima maksimalnu vrijednost $c_{z,\text{max}}$. To se događa pri naglom vadenju aviona iz obrušavanja ili pri naglom propinjanju kad se napadni kut krila u kratkom vremenskom intervalu mijenja od vrlo malog ili negativnog do kuta koji odgovara maksimalnom koeficijentu uzgona $c_{z,\text{max}}$. Uz opterećenje A_k aerodinamička rezultanta poprima najveće vrijednosti, a hvatište joj je u prednjem dijelu profila (kad krilo ima dvije ramenačice i prednja ramenačica preuzima veći dio sile). Rezultanta R može se rastaviti na normalnu (R_N) i tangencijalnu (R_T) komponentu s obzirom na tetivu profila (sl. 5), te je

$$R_N = Sq c_n, \quad (6)$$

$$R_T = Sq c_t,$$

gdje je S površina krila, $q = \frac{1}{2}\rho v^2$ dinamički pritisak, a

$$c_n = c_z \cos \alpha + c_x \sin \alpha, \quad (7)$$

$$c_t = c_x \cos \alpha - c_z \sin \alpha.$$

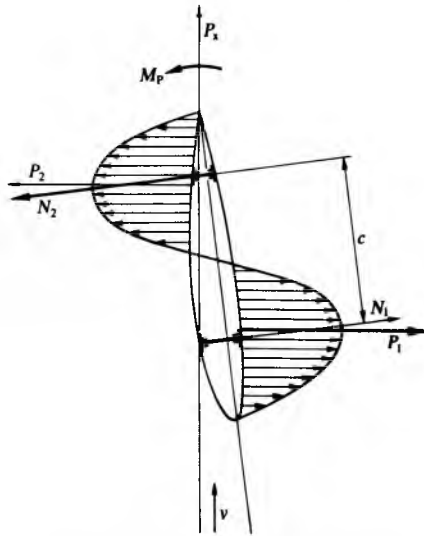


Sl. 5. Aerodinamička sila i njene komponente na profilu krila u normalnom krivolinijskom letu

Prema propisima za takvo je opterećenje koeficijent preopterećenja $n = 3 \dots 9$ (prema vrsti i namjeni aviona), a koeficijent sigurnosti $j = 1,5$.

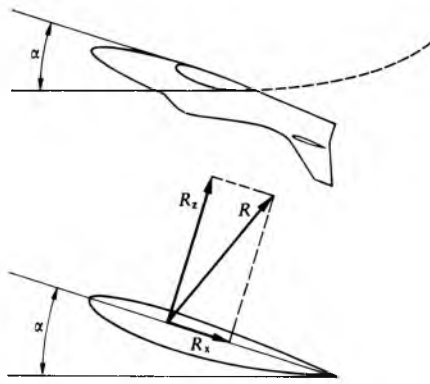
Opterećenje B_k pojavljuje se u krivolinijskom letu s malim napadnim kutovima, kao npr. pri blagom vađenju aviona iz obrušavanja kada se napadni kut ne povećava do kritičnoga. Hvatište rezultante bliže je izlaznom rubu (jače je opterećena stražnja ramenjača). Prema nekim propisima za opterećenje B_k treba uzeti i istodobni otklon krilaca, što uzrokuje nesimetričnu raspodjelu uzgona uzduž raspona krila. Koeficijent $n = 1,5 \dots 5$, a koeficijent $j = 2$.

Opterećenje C_k pojavljuje se pri vertikalnom obrušavanju s napadnim kutom uz koji nema sile uzgona. Raspored opterećenja po tetivi krila prikazan je na sl. 6. Krilo je opterećeno silom P_x i momentom M_p sprega sila P_1 i P_2 . Kad krilo ima dvije ramenjače, moment torzije M_p opterećuje obje ramenjače silom $N = M_p/c$, a kad krilo ima jednu ramenjaču, to opterećenje preuzima torzijska kutija. Zbog toga što nema sile uzgona koeficijent je $n = 1$, a koeficijent $j = 2$.



Sl. 6. Raspored opterećenja po tetivi krila pri obrušavanju aviona

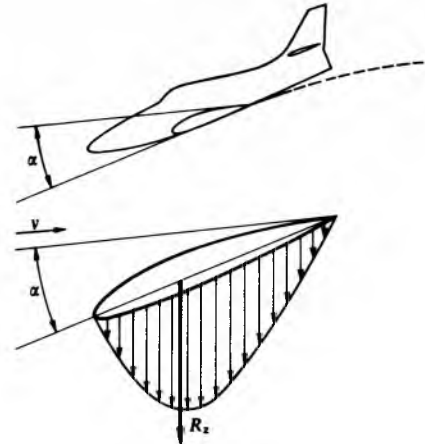
Opterećenje D_k pojavljuje se pri krivolinijskom letu uz napadni kut najveće negativne sile uzgona. U položaju koji odgovara tom opterećenju avion se nalazi ili u leđnom letu (sl. 7), što se odnosi samo na lovačke i akrobatske avione, ili u naglom prijelazu iz horizontalnog leta u strmo poniranje (sl. 8). Najveća su opterećenja u prednjem dijelu krila i djeluju u smjeru donje površine krila. Tada je koeficijent $n = 1,3 \dots 2,5$, a koeficijent $j = 1,5$.



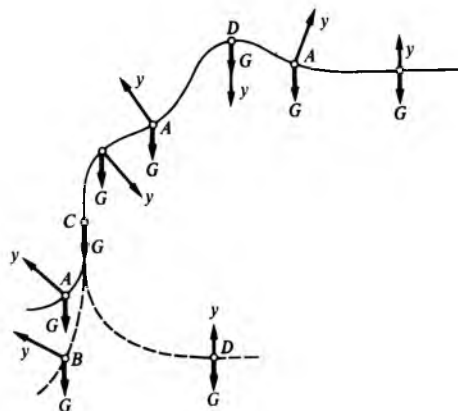
Sl. 7. Aerodinamička sila i njene komponente na profilu krila u leđnom letu aviona

Opterećenje E_k pojavljuje se pri grubom slijetanju aviona pod napadnim kutom koji odgovara c_{zmax} . Pri udaru aviona o tlo kinetička je energija udara određena izrazom $T = mv^2/2$

(v. *Stajni organi* u ovom članku). Jedan dio te sile djeluje na krilo ovisno o masi krila i djelotvornosti amortizacije stajnog trapa. Ako se u krilu nalazi velik dio ukupne mase aviona, kao npr. motori, rezervoari goriva, naoružanje i sl., opterećenja mogu poprimiti velike vrijednosti. Opterećenje zbog tih sila umanjeno je prema propisima za silu uzgona za vrijednost od $0,75G$, gdje je G masa aviona. Koeficijent $n = 1,7 \dots 3$, a koeficijent $j = 1,8$.

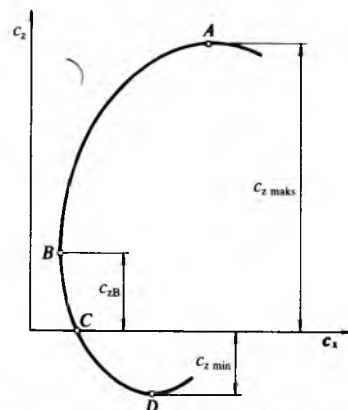


Sl. 8. Raspored opterećenja na profilu krila u momentu prijelaza aviona iz horizontalnog leta u strmo obrušavanje



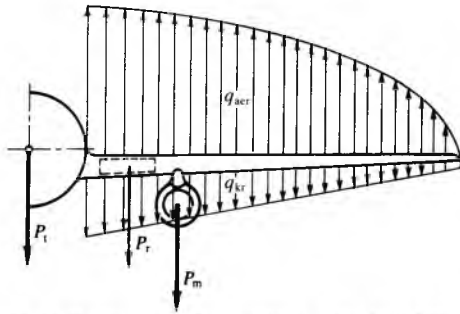
Sl. 9. Trajektorija aviona i smjer centripetalne sile i sile gravitacije u različitim uvjetima leta

Na sl. 9 prikazana je trajektorija aviona kad se pojavljuju opisana opterećenja krila. Centripetalna neuravnotežena sila y usmjerena je uvijek prema središtu krivine trajektorije, a sila gravitacije G (masa aviona) vertikalno naniže. Karakteristike leta pri kojemu se pojavljuju opisana opterećenja prikazane su na polari aviona $c_z = f(c_x)$ na sl. 10.



Sl. 10. Polara aviona za različite uvjete leta

Vanjske sile. U letu na krilo djeluju: aerodinamičke sile q_{aer} , inercijske sile mase konstrukcije q_{kr} i sile pobudene djelovanjem mase pojedinih sklopova (motori, naoružanje, rezervoari i dr.). Prve dvije sile pojavljuju se kao kontinuirana, a treća kao koncentrirana opterećenja (sl. 11). Dodatno opterećenje pojavljuje se u trenutku djelovanja vatrenog naoružanja (mitraljezi, topovi) ugrađenog u krilima vojnih aviona.

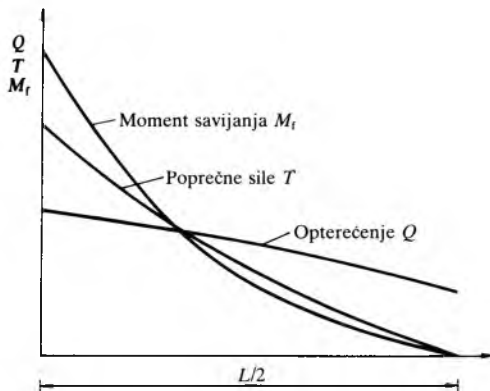


Sl. 11. Kontinuirana i koncentrirana opterećenja krila aviona

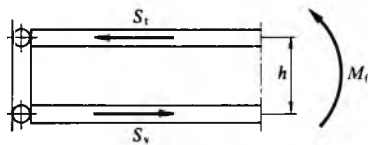
Aerodinamička sila što opterećuje krilo u ustaljenom horizontalnom letu jednaka je masi aviona, $P = G$, a opterećenja koja djeluju u opisanim uvjetima leta određena su općenitim izrazom

$$P_{aer} = j n G. \quad (8)$$

Integriranjem krivulje raspodjele opterećenja Q uzduž raspona krila dobiva se krivulja poprečnih sila T , a integriranjem te krivulje, krivulja momenata savijanja M_f (sl. 12).



Sl. 12. Krivulje opterećenja Q , poprečne sile T i momenta savijanja M_f uzduž raspona krila



Sl. 13. Djelovanje momenta savijanja na krilo

Moment savijanja nastoji da savije krilo u smjeru djelovanja momenta. U uzdužnim će se elementima krila pojaviti u aksijalnom smjeru tlačne S_t , odnosno vlačne sile S_v , npr. u pojasovima ramenjače na sl. 13. Vrijednost sila S_t i S_v ovisi o momentu M_f i visini ramenjače h . Sile S_t i S_v čine par sila koji je u ravnoteži s momentom M_f , pa je

$$M_f = S_t h = S_v h, \quad (9a)$$

odakle proizlazi

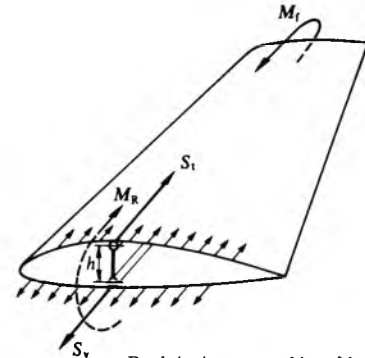
$$S_t = S_v = \frac{M_f}{h}. \quad (9b)$$

Povećanjem visine ramenjače smanjuju se naprezanja u njezinim pojasovima. Zbog toga je povoljnije krilo s relativno

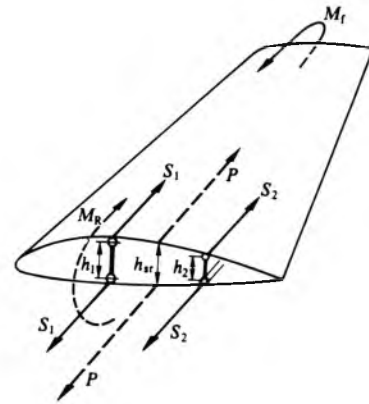
debelim profilom, što je obično u suprotnosti s aerodinamičkim zahtjevima. Suvremeni laminarni i semilaminarni profili obično imaju relativnu debljinu do maksimalno 12% (v. *Jednokrilac*, TE 6, str. 603), te se zbog toga primjenjuju krila s više ramenjača, s uzdužnicama, tzv. stringerima, sa sendvič-korom i sl. (v. *Avion*, TE 1, str. 583). U krilu s jednom ramenjačom (sl. 14), ako se zanemari djelovanje kore i eventualnih stringera, naprezanja u pojasu ramenjače, prema (9b), iznose

$$\sigma = \frac{S}{F}, \quad (10)$$

gdje je F površina presjeka jednog pojasa.



Sl. 14. Sile i momenti na krilu s jednom ramenjačom



Sl. 15. Sile i momenti na krilu sa dvije ramenjače

I za krilo sa dvije ramenjače vrijede odnosi sila i naprezanja kao i za krilo s jednom ramenjačom, samo što tada moment savijanja preuzimaju obje ramenjače (sl. 15). Visina prednje ramenjače h_1 i stražnje h_2 reducira se na srednju visinu h_{sr} fiktivne ramenjače

$$h_{sr} = \frac{h_1 + h_2}{2}, \quad (11a)$$

te je rezultirajuća tlačna, odnosno vlačna sila

$$P = \frac{M_f}{h_{sr}}, \quad (11b)$$

Sila P djeluje na gornje i donje pojasove ramenjača, a naprezanja se u pojasovima dobiju ako se sila P podijeli zbrojem površina njihovih presjeka, pa je

$$\sigma = \frac{P}{F_1 + F_2}, \quad (12)$$

gdje su F_1 i F_2 površine presjeka napregnutih na tlak, odnosno vlak prednje i stražnje ramenjače. Prema tome, sila S u jednom presjeku iznosi

$$S = \sigma F, \quad (13a)$$

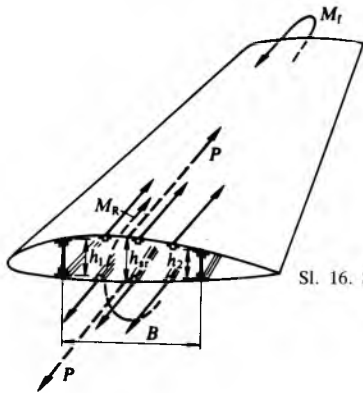
a potrebni presjek

$$F = \frac{S}{\sigma} \quad (13b)$$

Kad postoje tzv. monoblok-kрила (v. *Avion*, TE 1, str. 582), naprezanja zbog momenta savijanja preuzimaju svi uzdužni elementi strukture krila između dviju ramenjača (sl. 16). I tada je $P = M_t/h_{sr}$, a silu P preuzima površina presjeka strukturnog pojasa među ramenjačama ΣF koja iznosi

$$\Sigma F = F_1 + F_2 + nF_s + \delta B, \quad (13c)$$

gdje je F_1 površina presjeka pojasa prednje ramenjače, F_2 površina presjeka pojasa stražnje ramenjače, F_s površina presjeka jednog stringera, n broj stringera, δ debljina kore i B razmak među ramenjačama.



Sl. 16. Sile i momenti na monoblok-krilu

Naprezanje u zoni napregnutoj na vlak iznosi

$$\sigma_v = \frac{P}{F_1 + F_2 + nF_s + \delta B} \quad (14)$$

Udio nosivosti kore krila u zoni opterećenju na tlak najčešće će biti manji, jer zbog male debljine kore postoji mogućnost stvaranja nabora, pa površinu δB treba pomnožiti s tzv. redukcijским koeficijentom $\varphi < 1$, koji pokazuje udio potpuno iskorištene površine presjeka kore. Naprezanje u zoni opterećenju na tlak, dakle, iznosi

$$\sigma_t = \frac{P}{F_1 + F_2 + nF_s + \varphi \delta B} \quad (15)$$

Ukrucivanjem kore stringera povećava se udio korisnog presjeka kore, tj. povećava se koeficijent φ . Prema teorijskim radovima i eksperimentima pokazalo se da je uz razmak stringera $b < 40\delta$ presjek kore čitav iskorišten, pa je tada $\varphi = 1$. Ako je razmak među stringerima veći od 40δ , koeficijent φ određen je izrazom

$$\varphi = \frac{40\delta}{b}, \quad (16)$$

gdje je b srednji razmak stringera.

Izrazi za σ_v i σ_t vrijede u navedenom obliku kad su svi elementi strukture od istog materijala. Postoje, međutim, krila izvedena od različitih materijala, osobito kad su krila s korom u sendvič-izvedbi. Postoje krila od aluminijske legure i čelika, aluminijske legure i armiranog poliplasta i slično. Tada se moraju korigirati izrazi za σ_v i σ_t s obzirom na različiti modul elastičnosti E pojedinih materijala, jer mora biti zadovoljen uvjet $E_1/E_2 = \sigma_1/\sigma_2$.

Kad su pojasevi ramenjača, stringeri i kora od različitih materijala, naprezanja u pojasevima (σ_p) odnosno stringerima (σ_{st}) iznose

$$\sigma_p = \frac{M_t}{h_{sr} \left(F_1 + F_2 + nF_s \frac{E_{st}}{E_p} + \delta B \frac{E_{kt}}{E_p} \right)}, \quad (17a)$$

$$\sigma_{st} = \sigma_p \frac{E_{st}}{E_p}, \quad (17b)$$

gdje su E_p , E_{st} i E_{kt} moduli elastičnosti materijala pojasa, stringera i kore.

Ramenjača. Momente savijanja preuzimaju pojasevi ramenjače tako da gornji preuzima aksijalne tlačne, a donji vlačne sile, dok stijenka preuzima poprečne sile. Na sl. 17 prikazana je ramenjača kojoj je presjek simetričan s obzirom na neutralnu os $n-n$, a pojasevi su jednake debljine d . Moment inercije I presjeka ramenjače s obzirom na neutralnu os $n-n$ iznosi

$$I = \frac{1}{12} B(H^3 - h^3). \quad (18)$$

Budući da je

$$\sigma = \frac{M_t H}{2I}, \quad (19)$$

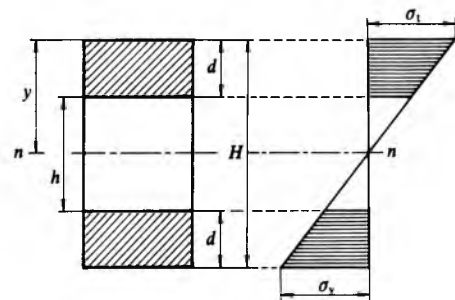
nakon uvrštenja dobiva se

$$\sigma = \frac{6 M_t H}{B(H^3 - h^3)}. \quad (20)$$

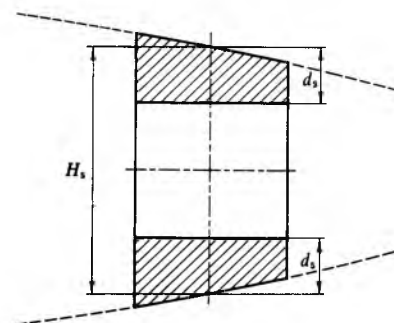
Ako je zadano maksimalno dopušteno naprezanje, može se (20) napisati u obliku

$$h^3 = H^3 - \frac{6 M_t H}{\sigma B}, \quad (21)$$

te je prema sl. 17 debljina pojasa $d = \frac{1}{2}(H - h)$.



Sl. 17. Naprezanje ramenjače jednako debelih pojasa i simetrične s obzirom na neutralnu os



Sl. 18. Drvena ramenjača s pojasevima koji nisu pravokutnog presjeka

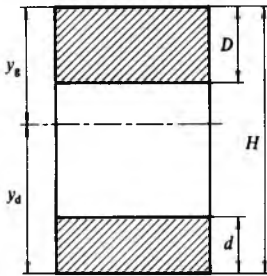
U praksi, osobito kad presjek širokih pojasa drvenih ramenjača nije pravokutan, jer gornja i donja površina slijede konturu profila krila, u izraz (21) uvrštava se srednja visina H_s (sl. 18), pa se pomoću nje određuje srednja debljina pojasa.

Nesimetrične kutijaste ramenjače. Kad su ramenjače od drva, mora se računati s različitom čvrstoćom drva na tlak i vlak. Tlačna je čvrstoća, naime, mnogo manja od vlačne, što ovisi o vrsti drva (v. *Drvene konstrukcije*, TE 3, str. 401). Zbog toga je za proračun mjerodavan gornji pojas koji preuzima tlačne sile, pa je uz jednaki presjek u donjem pojasu materijal nedovoljno iskorišten, što nepotrebno povećava težinu krila. Proračun ramenjače s pojasevima nejednakih debljina prilično je kompliciran, pa se u praksi primjenjuju različite približne metode koje daju rezultate zadovoljavajuće

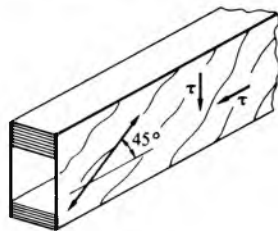
točnosti. U principu mogu se primijeniti sljedeće relacije (sl. 19):

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_v} \approx \frac{y_g}{y_d}, \quad \frac{D}{d} \approx \frac{\sigma_v}{\sigma_t} \quad (22)$$

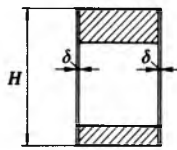
Postoje također nomogrami kojima se veoma olakšavaju i ubrzavaju proračuni tih elemenata.



Sl. 19. Linearni odnosi u nesimetričnoj kutijastoj drvenoj ramenjači



Sl. 20. Poprečne sile u nesimetričnoj kutijastoj drvenoj ramenjači

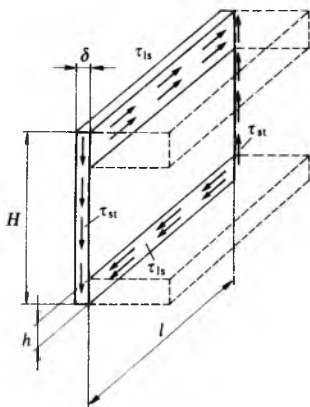


Stijenke preuzimaju poprečne sile u ramenjači, pa se djelovanjem poprečnih sila u stijenjkama pojavljuju horizontalne i vertikalne smične sile (sl. 20). Zato se za drvene ramenjače vlakna drvene ljepenke stijenka postavljaju pod kutom od 45° s obzirom na uzdužnu os ramenjače, a samo iznimno i vertikalno, ali nikada horizontalno. Smična su naprezanja

$$\tau = \frac{1,5T}{\Sigma \delta H} \quad (23a)$$

pa je ukupna debljina stijenki

$$\Sigma \delta = \frac{1,5T}{\tau H} \quad (23b)$$



Sl. 21. Smična naprezanja u stijenki i pojasovima kutijaste drvene ramenjače

Budući da je stijenka ramenjače veza gornjeg i donjeg pojasa, tako da pojasevi djeluju kao cjelina (kutija, odnosno I-nosač, sl. 21), veza između pojasa i stijenke mora zadovoljavati uvjet

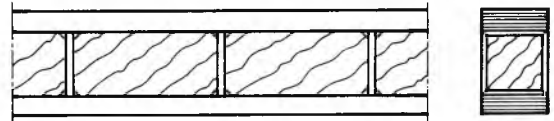
$$H \delta \tau_{st} l = h H \tau_{ls} l, \text{ odnosno } \delta \tau_{st} = h \tau_{ls} \quad (24)$$

gdje je τ_{st} smično naprezanje u stijenki, a τ_{ls} u lijepljenom spoju drvene, odnosno zakrivane metalne konstrukcije. Iz (24) proizlazi i drugi uvjet za određivanje minimalne debljine pojasa drvene ramenjače. Da bi lijepljeni spoj, naime, mogao preuzeti jednaka naprezanja kao i drvena ljepenka stijenke,

visina pojasa mora iznositi

$$h = \delta \frac{\tau_{st}}{\tau_{ls}} \quad (25)$$

Poboljšanje djelovanja stijenke postiže se u praksi postavljanjem tzv. dijafragmi između pojaseva ramenjače, jer se tako smanjuju slobodna polja stijenke i time sprečava stvaranje nabora (gužvanje) pod opterećenjem (sl. 22).



Sl. 22. Dijafragme između pojaseva drvene ramenjače

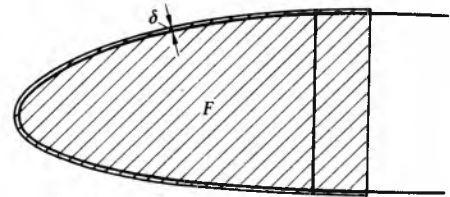


Sl. 23. Torzijska oplata. a krila s jednom drvenom ramenjačom, b krila s više metalnih ramenjača

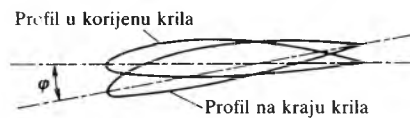
U suvremenim avionskim konstrukcijama torzijska naprezanja krila preuzima torzijska oplata (torzijska kutija). Ona se prostire ili od napadnog ruba krila do glavne ramenjače (sl. 23a), ili obuhvaća, u konstrukcijama s više ramenjača, polja među ramenjačama (sl. 23b). Za proračun krila na torziju za jednostavnije se konstrukcije primjenjuje Bredtova formula (sl. 24)

$$\tau = \frac{M_t}{2F\delta} \quad (26)$$

gdje je M_t moment torzije u promatranom presjeku, F površina presjeka ograničenoga torzijskom kutijom i ramenjačom, a δ debljina kore kutije.



Sl. 24. Torzijska kutija drvene ramenjače



Sl. 25. Kut torzije krila

I tada se radi ukrucenja kore torzijske kutije primjenjuje gušći raspored rebara ili uzdužni stringeri, odnosno kora je sendvič-izvedbe. U kompliciranijim konstrukcijama Bredtova formula ne daje dovoljno točne rezultate, pa se tada upotrebljavaju proračunske metode izvedene na osnovi teorije noseće ljuske. Osim što se određuju dimenzije elemenata torzijske kutije s obzirom na torzijska naprezanja, potrebno je provjeriti i torzijsku krutost kutije. Propisima je, naime, određena maksimalna vrijednost kuta φ , koji nastaje djelovanjem torzije, i to između tetive profila krila u korijenu i na kraju krila (sl. 25). Za krila velike vitkosti taj je uvjet često teže zadovoljiti nego torzijska naprezanja. Kad bi kut φ postao veći od dopuštene granične vrijednosti, promijenile bi se aerodinamičke karakteristike krila, što bi utjecalo i na performanse i na karakteristike stabilnosti aviona. Osim toga, mogla bi se pojaviti i dodatna nekontrolirana opterećenja, što bi moglo ugroziti stabilnost konstrukcije. Kut torzije $d\varphi$ elementa krila u radijanim iznosi

$$d\varphi = \frac{M_t O}{4F^2 \delta G} dx, \quad (27)$$

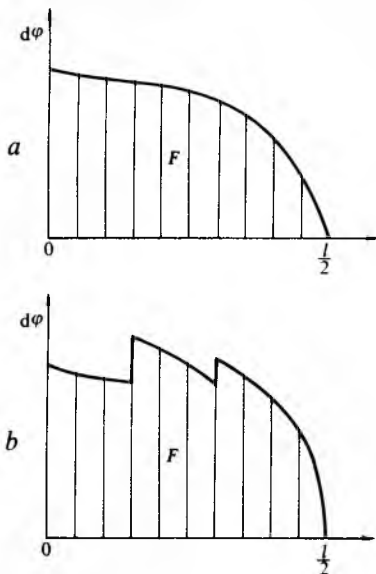
gdje je O opseg presjeka torzijske kutije, G modul smika

materijala torzijske kutije, dx element duljine (po rasponu), a ostale oznake odgovaraju onima u izrazu (26).

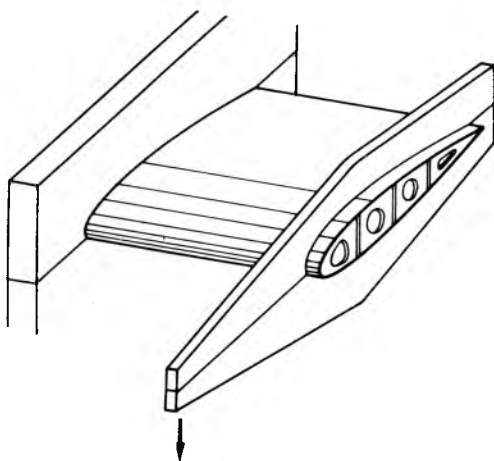
Ukupni je kut torzije φ na kraju krila

$$\varphi = \int_0^{l/2} \frac{M_t O}{4F^2 \delta G} dx. \quad (28)$$

Ako se vrijednosti kutova $d\varphi$ za pojedine presjeka unesu u dijagram iznad poluraspona krila kao apscise, površina F (sl. 26a) pomnožena mjerilom za ordinatu i apscisu daje vrijednost kuta φ u radijanima. Ako se debljina kore mijenja u pojedinim dijelovima raspona krila (tanja prema krajevima), na presjecima gdje se spajaju kore različitih debljina pojavljuju se u dijagramu dvije vrijednosti za $d\varphi$ (sl. 26b). Često se prije gradnje prototipa proračun provjerava pokusom do loma, odnosno do pojave nabora kore. Radi ekonomičnosti ti se pokusi izvode samo na segmentu krila. Tada se jedan od krajeva segmenta čvrsto ukliješti, a na slobodni kraj djeluje sila koja uzrokuje moment torzije (sl. 27).



Sl. 26. Krivulje kuta torzije. *a* za jednoliku debljinu kore krila, *b* za promjenljivu debljinu kore krila



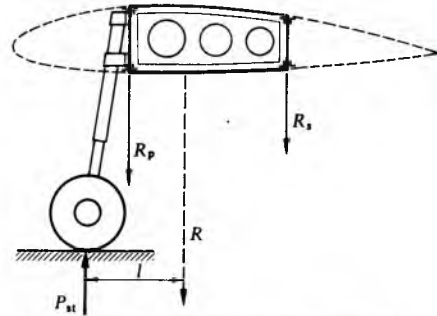
Sl. 27. Ispitivanje segmenta krila na opterećenje torzijom

Rebra krila imaju zadatak da krilu daju određeni aerodinamički oblik (aeroprofil) i da ga održavaju u svim uvjetima leta i pod svim opterećenjima, te da prenose opterećenja s površine krila na ramenjače. Osim toga, tzv. pojačana rebra preuzimaju naprezanja različitih koncentriranih opterećenja (npr. motora preko motorskog nosača, stajnog trapa, odnosno plovaka preko spojnih okova, naoružanja, različite opreme).

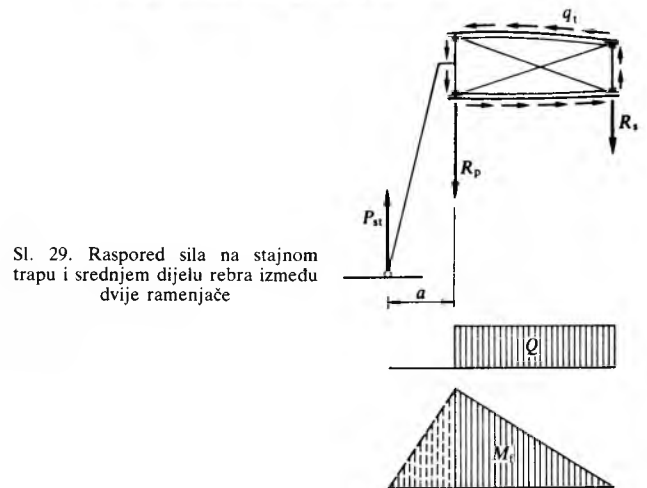
Na sl. 28 primjer je srednjeg dijela rebra između dviju ramenjača na koji djeluje sila reakcije stajnog trapa P_{st} zbog koje nastaje smično naprezanje

$$\tau = \frac{P_{st}}{H_1 \delta_1 + H_2 \delta_2}, \quad (29a)$$

gdje je H_1 visina stijenke prednje ramenjače, H_2 visina stijenke stražnje ramenjače, a δ_1 i δ_2 debljine stijenke prednje i stražnje ramenjače.



Sl. 28. Položaj stajnog trapa prema rebro krila



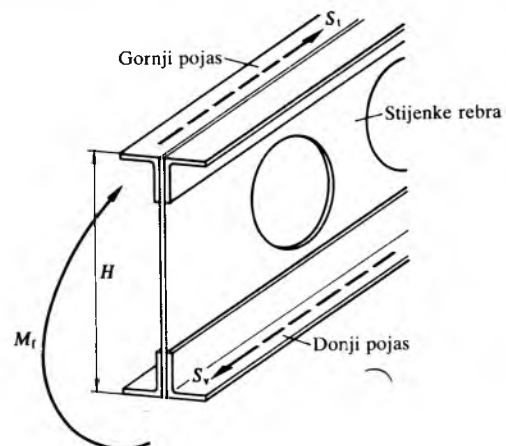
Sl. 29. Raspored sila na stajnom trapu i srednjem dijelu rebra između dvije ramenjače

Rebro je kruto vezano preko uglovnica sa stijenka ramenjača, pa se naprezanja prenose i na rebro. Zbog toga djeluju u prednjem, odnosno stražnjem spoju sile reakcije R_p i R_s koje iznose:

$$R_p = \tau H_1 \delta_1, \quad R_s = \tau H_2 \delta_2, \quad (29b)$$

$$R_p + R_s = R = P_{st}$$

Sile P_{st} i R tvore par sila s krakom l . Taj torzijski moment uravnotežen je korom krila i stijenka ramenjače kao



Sl. 30. Moment i sile u pojasima rebra krila djelovanjem sile u stajnom trapu

torzijskim elementom površine F u kojemu je unutrašnje naprezanje $\tau = q_t/\delta$, te je

$$q_t = \frac{M_t}{2F} \quad (30)$$

Poprečna je sila (sl. 29)

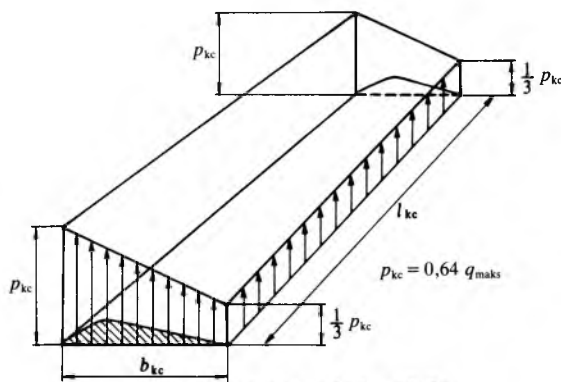
$$Q = R_s - q_t H_2 \quad (31)$$

Raspored momenta savijanja ima oblik trokuta s maksimumom u ravnini prednje ramenjače, pa je $M_{fmax} = P_{st} a$. Poprečnu silu Q preuzima stijenka rebra u kojoj nastaju posmična naprezanja $\tau = Q/(H\delta)$. Moment savijanja preuzimaju gornji i donji pojas rebra koji su opterećeni tlačnom i vlačnom aksijalnom silom S koja je određena izrazom $S = M_t/H$. Normalno je naprezanje u pojasu $\sigma = S/f$, gdje je f površina presjeka pojasa (sl. 30).

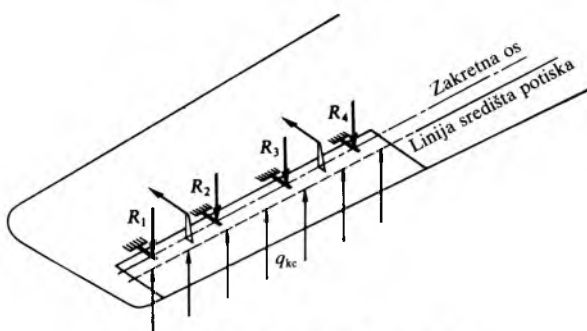
Krilca. Glavna opterećenja na krilcima nastaju djelovanjem aerodinamičkih sila, a ovise o režimu leta i kutu otklona krilaca (v. *Opterećenje aviona*, TE 9, str. 625). Prema propisima čvrstoća krilaca razmatra se jednom uz pretpostavku da su sastavni dio krila, a drugi put uz opterećenje krilaca pri naglom otklonu pri velikim brzinama leta. Propisano opterećenje iznosi

$$p_{kc} = 0,64 q_{max} \quad (32)$$

gdje je $q_{max} = \frac{1}{2} \rho v_{max}^2$ dinamički pritisak pri maksimalnoj brzini leta.



Sl. 31. Raspored opterećenja na krilcu



Sl. 32. Odnos sile potiska i sile reakcije krilca

Raspored opterećenja, prema sl. 31, određen je izrazom

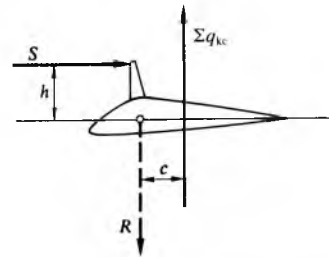
$$q_{kc} = b_{kc} \frac{p_{kc} + \frac{1}{3} p_{kc}}{2} \quad (33a)$$

Zakretna os krilaca uvijek je ispred linije središta potiska (sl. 32), pa na spojnim okovima s krilom nastaju sile reakcije R_1, R_2, R_3, R_4 . Suma sila reakcije R u ravnoteži je s opterećenjem krilca, te je

$$R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = \Sigma q_{kc} \quad (33b)$$

gdje je $\Sigma q_{kc} = q_{kc} l_{kc}$.

Sila reakcije R i aerodinamička sila Σq_{kc} tvore par sila koje nastoje vratiti krilca iz otklonjenog položaja. Tome se suprotstavlja moment sile u komandi i poluga krilca (sl. 33), te je za ravnotežu potrebno da bude $\Sigma q_{kc} c = Sh$.



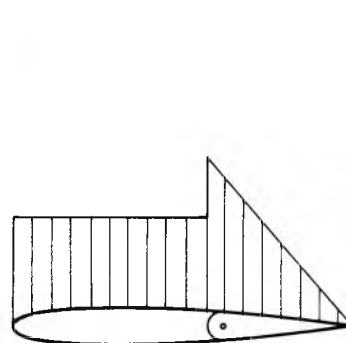
Sl. 33. Moment sile na polugi krilca

Za proračun čvrstoće krilaca treba odrediti raspored opterećenja uzduž raspona, linije momenta savijanja i poprečnih sila. Pri tom se može krilce, odnosno njegova ramenjača promatrati kao kontinuirano opterećeni nosač na više ležaja, što je prilično složeno (u tu se svrhu mogu vrlo dobro primijeniti Clapeyronove jednačbe za gredu na više ležaja). Problem se može pojednostavniti ako se pretpostavi da je krilce sastavljeno iz dva ili više dijelova spojenih okovom šarnira, te se proračunava svaki dio posebno kao da se radi o gredi na dva ležaja.

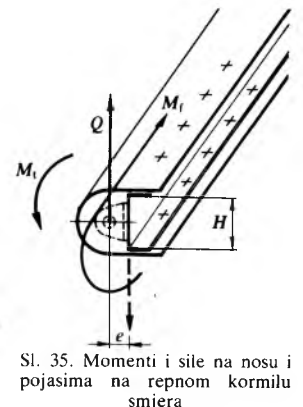
REPNE POVRŠINE

Proračun sila i naprezanja što se pojavljuju u letu na elementima repnih površina u biti je analogan proračunu sila i naprezanja što djeluju na krilo.

Na *horizontalnim repnim površinama* pojavljuju se aerodinamičke sile koje uravnotežuju moment krila. Opterećenja određena aerodinamičkim proračunom treba usporediti s opterećenjima što su zadana propisima te s onima većim proračunati čvrstoću. Opterećenje koje djeluje na horizontalne repne površine raspoređeno je između stabilizatora i visinskog kormila proporcionalno njihovim površinama. Raspored opterećenja po dubini profila vidi se na sl. 34. U praksi se obično ramenjača, ili ramenjače, horizontalnog stabilizatora dimenzionira uz pretpostavku da preuzima ukupno opterećenje repnih površina, jer visinsko kormilo preko veznih okova šarnira prenosi opterećenje na horizontalni stabilizator. Dalji proračun jednak je proračunu opterećenja krilaca.



Sl. 34. Raspored opterećenja na horizontalnoj repnoj površini



Sl. 35. Momenti i sile na nosu i pojasima na repnom kormilu smjera

Tok je proračuna za *vertikalne repne površine* u biti jednak toku proračuna za horizontalne. Ramenjača smjernog kormila promatra se kao kontinuirano opterećeni nosač na više ležaja, ali se, zbog pojednostavnjenja, može pretpostaviti da je ramenjača iz dva dijela koji su međusobno spojeni okovom šarnira, te se problem svodi na proračun grede na dva ležaja. Normalna naprezanja zbog djelovanja momenta savijanja M_t , poprečna sila Q i moment torzije M_t određuju se kao za krila. Moment savijanja uzrokuje u pojasovima ramenjače i pripadnog dijela kore nosa kormila (sl. 35) tlačna i vlačna

naprezanja. Normalno je naprezanje u promatranom dijelu kormila

$$\sigma = \frac{M_t}{HF_p}, \quad (34)$$

gdje je H razmak među središtima težišta pojasa ramenjače i pripadnog dijela kore nosa, a F_p površina presjeka pojasa i pripadnog dijela kore nosa.

Smično naprezanje u stijenci ramenjače djelovanjem poprečne sile Q iznosi

$$\tau_t = \frac{Q}{H\delta}, \quad (35)$$

gdje je δ debljina stijenke ramenjače.

Os okova šarnira nalazi se ispred stijenke ramenjače, pa nastaje moment sile reakcije stijenke ramenjače Qe , koji umanjuje torzijski moment kormila M_t te rezultirajući moment iznosi $M_t - Qe$.

Smično naprezanje zbog djelovanja momenta torzije M_t u sklopu ramenjača-kora nosa iznosi prema Bredtu

$$\tau_t = \frac{M_t - Qe}{2F\delta}, \quad (36a)$$

gdje je F površina presjeka ograničenoga konturom presjeka nosa i stijenke ramenjače, a δ debljina kore nosa, odnosno stijenke ramenjače.

Rezultirajuće je smično naprezanje u stijenci ramenjače

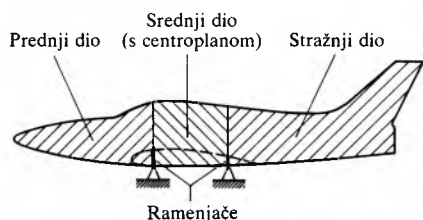
$$\tau = \tau_t + \tau_s. \quad (36b)$$

Vertikalni stabilizator kao konzolni nosač upet je u trup aviona i opterećen silama torzije i savijanja, pa se mogu analognim postupkom kao i za krilo odrediti raspodjela opterećenja, sile, momenti i naprezanja u pojedinim elementima.

TRUP

Trup je opterećen s jedne strane aerodinamičkim silama krila i repnih površina, te silama koje nastaju djelovanjem propulzijske grupe, a s druge strane inercijskim silama mase opreme, uređaja i tereta smještenih u trupu, te mase samog trupa.

Kao i za krilo i ostale dijelove aviona, tako su i za trup propisana opterećenja što se mogu pojaviti u eksploataciji, a ovise o načinu leta. Radi pojednostavnjenja obično se pretpostavlja da se trup sastoji od tri dijela (sl. 36) koji se posebno proračunavaju. Takav postupak zadovoljava točnošću rezultata, a opravdan je i time što su i propisima uglavnom zadana opterećenja posebno za svaki dio trupa.

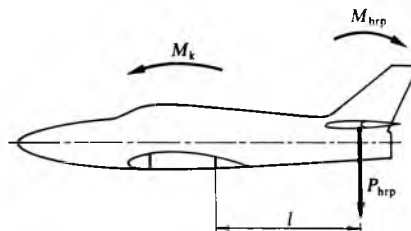


Sl. 36. Podjela trupa aviona na tri osnovna dijela

Sva opterećenja predviđena propisima mogu se svrstati u dvije grupe: a) grupu simetričnih opterećenja s obzirom na vertikalnu ravninu simetrije i b) grupu nesimetričnih opterećenja. Radi ilustracije razmatraju se dva karakteristična opterećenja: opterećenje C_t iz grupe simetričnih opterećenja i opterećenje H_t iz grupe nesimetričnih opterećenja.

Opterećenje C_t pojavljuje se pri naglom vađenju aviona iz obrušavajućeg leta. Opterećenja koja treba odrediti odgovaraju aerodinamičkom opterećenju koje djeluje na horizontalne repne površine (horizontalni stabilizator + visinsko kormilo). Tokom obrušavanja djeluje moment krila M_k koji je uravnotežen momentom horizontalnih repnih površina M_{hrp} (sl. 37), tj. umnoškom aerodinamičke sile na horizontalne

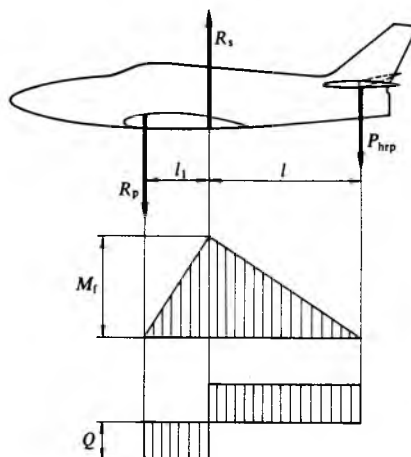
repne površine i udaljenosti l hvatišta te sile od neke reperne točke na profilu krila (obično ravnine stražnje ramenjače). Aerodinamička sila na horizontalnu repnu površinu iznosi $P_{hrp} = M_k/l$.



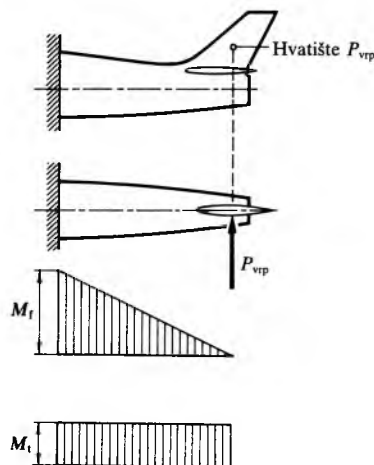
Sl. 37. Moment krila i moment horizontalnih repnih površina

Većina propisa određuje opterećenje po jedinici površine horizontalnih repnih površina. Ta su opterećenja obično veća od onih dobivenih aerodinamičkim proračunom, te za proračun čvrstoće treba uvijek uzeti veću vrijednost.

Sila P_{hrp} uzrokuje u trupu moment savijanja M_t , koji ima maksimum u ravnini stražnje ramenjače centropplana, pa je $M_t = P_{hrp}l$, dok je poprečna sila $Q = P_{hrp}$. Sila reakcije R_p u spoju prednje ramenjače iznosi $R_p = M_t/l_1$ (sl. 38). Sile reakcije R_s u spoju stražnje ramenjače $R_s = R_p + P_{hrp}$. Time su ujedno određene i sile u okovima spoja krila s centropplanom.



Sl. 38. Opterećenje trupa aviona momentom savijanja M_t i poprečnom silom Q



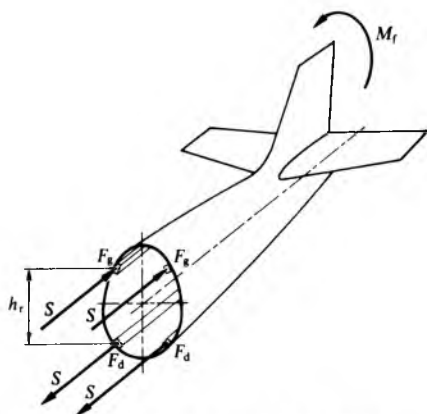
Sl. 39. Nesimetrično opterećenje trupa aviona zbog otklona kormila smjera

Treba još provjeriti i sile inercije što nastaju u času naglog vađenja aviona iz obrušavanja i djeluju u vertikalnoj ravnini simetrije aviona. Maksimalni moment za stražnji dio trupa (od ravnine stražnje ramenjače) određen je zbrojem parcijal-

nih momenata opreme, tereta i konstruktivnih elemenata stražnjeg dijela trupa. Isto će se tako dobiti i moment za prednji dio. Poprečne su sile jednake zbroju parcijalnih gravitacijskih sila.

Kao primjer *nesimetričnog opterećenja trupa* uzeto je opterećenje H , tj. opterećenje trupa pod silama koje nastaju naglim otklonom smjernog kormila (sl. 39). Djelovanjem aerodinamičke sile P_{vzp} (odnosno sile kojoj je vrijednost određena propisima) na vertikalne repne površine nastaje moment koji savija trup u horizontalnoj ravnini. Nadalje, budući da se hvatište sile P_{vzp} ne nalazi skoro nikada u osi trupa, nego iznad nje, nastaje moment torzije koji djeluje na taj dio trupa. Taj je moment konstantan od hvatišta sile do ravnine stražnje ramenjače.

Proračun normalnih naprezanja. U trupu kutijastog tipa s ramenjačama (v. Avion, TE 1, str. 587) moment savijanja uglavnom preuzimaju ramenjače trupa. Uzdužni stringeri i okviri služe za održavanje oblika presjeka trupa i preuzimanje lokalnih opterećenja. Kora je tanka jer u prvom redu služi za aerodinamičko oblikovanje trupa, te se u proračunima ne uzima u obzir.



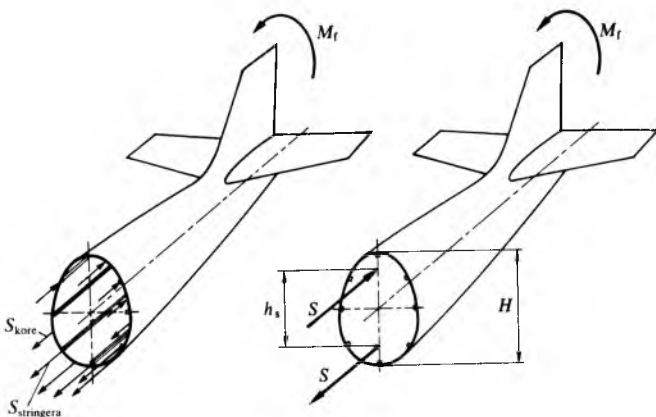
Sl. 40. Sile u ramenjačama trupa

Zbog djelovanja momenta savijanja M_f (sl. 40) nastaju u ramenjačama trupa sile $S = M_f / (2h_r)$, gdje je h_r vertikalni razmak među težištima ramenjača. Naprezanja su u tim elementima određena izrazima

$$\sigma = \frac{S}{F_g}; \quad \sigma = \frac{S}{F_d}, \quad (37)$$

gdje su F_g i F_d površine presjeka gornjih, odnosno donjih ramenjača.

Trupovi kutijastog tipa sa stringerima prijelazni su tip prema tipu trupa s nosećom ljuskom. Naprezanja preuzimaju i stringeri i djelomično kora trupa. Sile koje djeluju u zoni tlačnih i vlačnih naprezanja (sl. 41) svode se na par sila $S = M_f / h_s$, gdje je h_s krak para sila.



Sl. 41. Sile u stringerima trupa

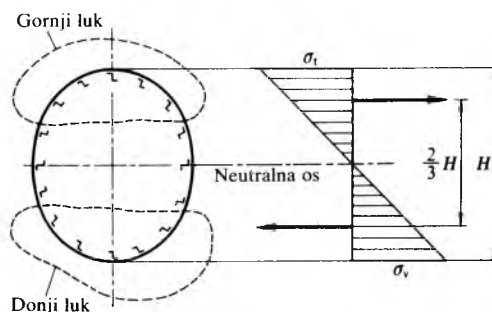
S dovoljnom se točnošću može računati $h_s = 2H/3$, gdje je H visina presjeka trupa, te je

$$S = \frac{3M_f}{2H}. \quad (38)$$

Napreznja su najveća u dijelovima najviše udaljenima od neutralne osi, pa se napreznja određuje samo u elementima u gornjem i donjem luku presjeka trupa (sl. 42). Površina je presjeka u luku

$$F_l = n f_s + \varphi f_k, \quad (39)$$

gdje je n broj stringera u luku, f_s površina poprečnog presjeka stringera, f_k površina presjeka kore u luku, φ redukcijski koeficijent prema izrazima (15) i (16).



Sl. 42. Zone maksimalnog naprezanja u poprečnom presjeku trupa

Normalna napreznja u stringerima iznose

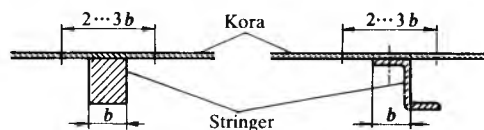
$$\sigma_s = \frac{S}{F_l} = \frac{3M_f}{2H(n f_s + \varphi f_k)}. \quad (40a)$$

Prema nekim propisima treba u proračun uvrstiti, kao element koji preuzima napreznja, i pojas kore uz stringer. Širina tog pojasa iznosi 2...3 širine stringera (sl. 43).

U trupu s nosivom ljuskom kora preuzima ukupni moment savijanja M_f . Napreznje u kori iznosi

$$\sigma_k = \frac{3M_f}{2H f_k}. \quad (40b)$$

U praksi je nemoguće ostvariti konstrukciju s potpuno nosivom ljuskom po cijeloj duljini trupa. Zbog lokalnih napreznja, izreza, otvora i sl. moraju se ugraditi različiti uzdužni elementi, okviri, pojačanja i dr., tako da se u praksi uglavnom radi o proračunu trupa sa stringerima.



Sl. 43. Proračunska širina nosivog pojasa uz stringer trupa

Za bočna nesimetrična opterećenja vrijede sve prethodno navedene relacije, samo što u svim izrazima umjesto visine presjeka trupa H dolazi širina presjeka trupa B .

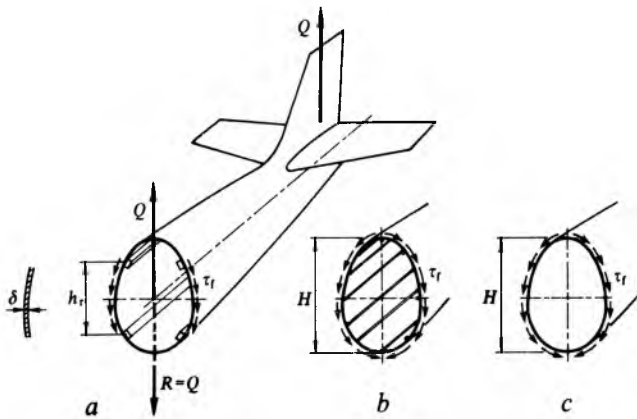
Smična napreznja. Smična (tangencijalna) napreznja u kori trupa nastaju djelovanjem poprečnih sila Q i momenta torzije M_t . Moment torzije pojavljuje se samo kad je trup nesimetrično opterećen. Djelovanjem poprečne sile Q nastaju u bočnim dijelovima kore trupa smična napreznja τ_t . U gornjem i donjem luku presjeka ta su napreznja posve malena, te se mogu zanemariti.

U kutijastom trupu s ramenjačama (sl. 44a) silu Q preuzimaju bočne stijenke koje imaju površinu presjeka $2h_r \delta$, pa je napreznje

$$\tau_t = \frac{Q}{2h_r \delta}, \quad (41a)$$

gdje je δ debljina kore.

U trupu sa stringerima i u trupu s nosivom ljuskom (sl. 44b i c) silu Q preuzimaju bočne stijenke za koje se računa



Sl. 44. Djelovanje poprečne sile: a) na kutijasti trup s ramenjačama, b) na trup sa stringerima, c) na trup s nosivom ljuskom

da imaju visinu od $2H/3$, pa površina njihova presjeka iznosi $4H\delta/3$. Naprezanje, prema tome, iznosi

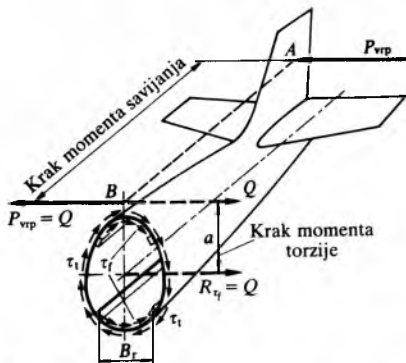
$$\tau_t = \frac{3Q}{4H\delta} \quad (41b)$$

Kad je opterećenje trupa nesimetrično, nastaju smična naprezanja djelovanjem sile Q i momenta torzije M_t . Ako na vertikalne repne površine djeluje sila P_{vvp} , nastaje moment torzije $M_t = Qa$, gdje je a vertikalni razmak ravnine djelovanja sile P_{vvp} od sredine presjeka trupa (sl. 45). Poprečnu silu Q u nekom presjeku trupa preuzima gornji i donji luk kore gdje se pojavljuju naprezanja τ_t . Za trup s ramenjačama naprezanje iznosi

$$\tau_t = \frac{Q}{2B_r} \quad (42)$$

gdje je B_r razmak među ramenjačama.

Smična naprezanja τ_t daju rezultirajuću silu $R_{\tau_t} = Q$ koja sa silom P_{vvp} tvori par sila uzrokujući torziju trupa. Moment je torzije $M_t = Qa$ ili $M_t = P_{vvp}a$.



Sl. 45. Moment torzije i moment savijanja trupa

Taj torzijski moment preuzima kora trupa po cijeloj konturi presjeka, te u kori nastaju smična naprezanja τ_t uzrokovana torzijom. Ta smična naprezanja prema Bredtovoj formuli iznose

$$\tau_t = \frac{M_t}{2F\delta} \quad (43)$$

gdje je F površina presjeka trupa.

Ako je trup sa stringerima ili s nosivom ljuskom, vrijede svi navedeni izrazi, osim što je vrijednost B_r zamijenjena sa $2B/3$, gdje je B širina trupa u promatranom presjeku.

Za rešetkaste trupove, koji se danas sve rjeđe primjenjuju, vanjske se sile određuju kao i u prethodnim primjerima, a naprezanja u štapovima rešetke trupa proračunavaju se uobičajenim metodama statike.

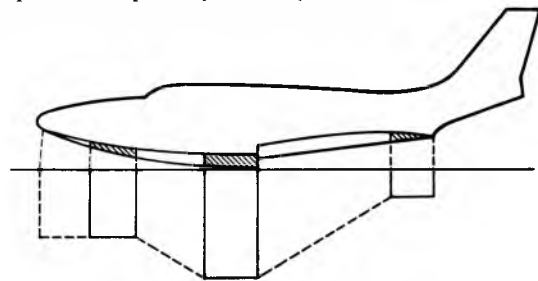
Hidroavionski trupovi (hidrotrupovi) konstrukcijski su identični običnim avionskim trupovima sa stringerima ili

nosivom ljuskom, s razlikom što je dno oblikovano prema zahtjevima hidrodinamike i pojačano da bi moglo preuzeti naprezanja zbog hidrodinamičkih sila pri polijetanju i slijetanju.

Svi propisi uglavnom razlikuju dvije grupe hidroavionskih trupova, i to prema namjeni: a) hidroavioni za polijetanje i slijetanje na mirnim površinama i b) za polijetanje i slijetanje na uzburkanim površinama. Pri tom se promatraju tri glavne vrste naprezanja: udar u pramčanu zonu, u zonu stepenice i u krmenu (repu) zonu, te raspodjela tlaka na dno među tim zonama (sl. 46). U praksi se često za određivanje potrebne debljine kore dna upotrebljava iskustvena formula

$$\delta = 0,5b\sqrt{\frac{p}{\sigma_d}} \quad (44)$$

gdje je δ debljina kore u mm ako je b širina pruge kore među stringerima u mm, p hidrodinamički tlak na dno u N/mm^2 , a σ_d dopušteno naprezanje materijala kore u N/mm^2 .



Sl. 46. Udarne zone i raspodjela tlaka na dno trupa hidroaviona

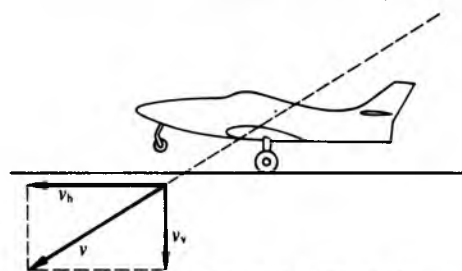
Budući da su repne površine hidroaviona radi zaštite od valova i prskanja smještene relativno visoko, a kormilo je pravca radi boljeg manevriranja na vodi veće nego na avionu, to su i nesimetrična naprezanja hidroavionskog trupa veća nego avionskoga. Također treba uzeti u obzir povećana lokalna naprezanja u zoni okova za privez i vuču (remorkiranje) hidroaviona.

STAJNI TRAP

Za proračun stajnog trapa osnovna je veličina brzina udara, tj. vertikalna komponenta brzine slijetanja aviona neposredno prije dodira s tlom (sl. 47). Ukupan je iznos kinetičke energije koju mora preuzeti stajni trap

$$T = \frac{m v_v^2}{2} \quad (45)$$

gdje je m masa aviona, a v_v vertikalna brzina (brzina udara).



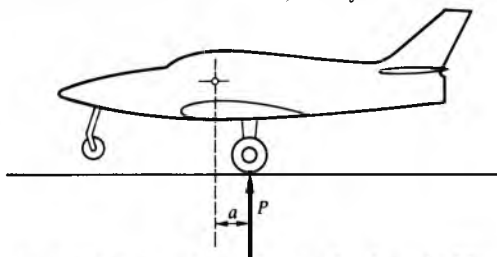
Sl. 47. Brzina udara pri slijetanju aviona

Izraz (45) vrijedi kad smjer djelovanja sile pri slijetanju prolazi kroz težište aviona, a ako ne prolazi, kinetička energija iznosi

$$T = \frac{\psi m v^2}{2} \quad (46)$$

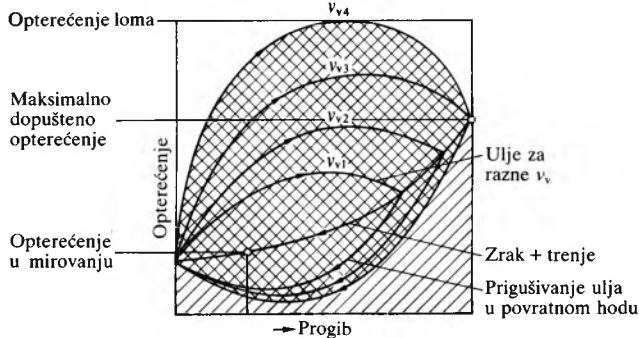
gdje je ψ redukcijски faktor mase, koji ovisi o udaljenosti smjera djelovanja sile od težišta aviona (sl. 48), o kutu pod kojim sila djeluje i o polumjeru momenta tromosti aviona. Kao i za ostale elemente aviona, tako i za stajni trap propisi predviđaju različita opterećenja na kojima se zasnava prora-

čun. Prema propisima među simetrična opterećenja spadaju: slijetanje na tri točke, slijetanje na glavne kotače, slijetanje s kočenjem, udar prednjim kotačem ili drljačom, a među nesimetrična opterećenja: slijetanje na jedan kotač, slijetanje na jedan kotač s bočnim udarom, vožnja u zaokretu i dr.

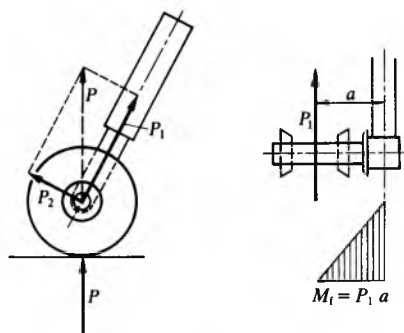


Sl. 48. Udaljenost smjera djelovanja sile udara od težišta aviona

Kinetičku energiju udara preuzimaju svi ili neki od voznih dijelova stajnog trapa prema načinu slijetanja. Kinetičku energiju udara apsorbiraju i amortiziraju manjim dijelom pneumatici kotača, a većim dijelom amortizeri (elastične noge). Rad amortizera proračunava se na osnovi tzv. radnog dijagrama što ga daje njegov proizvođač (v. *Avion*, TE 1, str. 591). Na sl. 49 prikazan je radni dijagram oleopneumatskog amortizera s ucrtanim krivuljama za različite brzine udara, odnosno za različite vertikalne brzine.

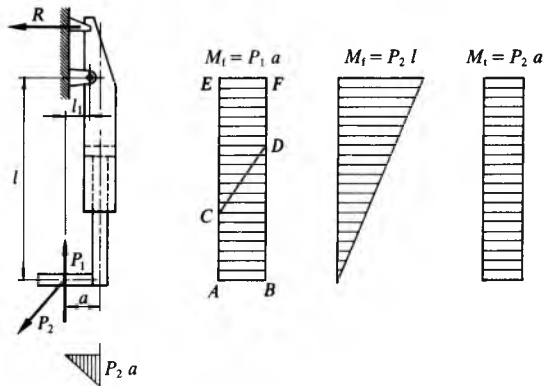


Sl. 49. Radni dijagram amortizera stajnog trapa



Sl. 50. Raspored sila na konzolnoj nozi stajnog trapa

Kao primjer za proračun prikazana je na sl. 50 konzolna (slobodnonosiva) noga stajnog trapa. Sila P rastavljena je na komponentu P_1 , koja djeluje u ravni osovine i noge, i na komponentu P_2 , koja je okomita na tu ravninu. Djelovanjem sile P_1 osovina kotača opterećena je momentom $M_f = P_1 a$ s maksimumom u spoju osovine s nogom. Jednakim momentom opterećena je preko osovine i noga stajnog trapa. Promatra li se noga stajnog trapa kao konzola, dobiva se raspodjela momenta kao na sl. 51. Tada se dio $ABCD$ odnosi na nogu klipa, a dio $CDEF$ na cilindar amortizera. Sila P_1 opterećuje nogu na tlak te je $\sigma_t = P/F$, odnosno, jer se radi o cijevi, tada je $\sigma_t = \frac{4P}{\pi} (D^2 - d^2)$, gdje je D vanjski, a d unutrašnji promjer. Budući da je cijev noge klipa obično kratka s debelim stijenkama, neće se noga klipa izviti. Djelovanjem



Sl. 51. Raspored i vrijednosti momenata na konzolnoj nozi stajnog trapa

momenta savijanja M_f naprezanje je u cijevi noge klipa

$$\sigma_t = \frac{M_f}{W_f}, \quad (47)$$

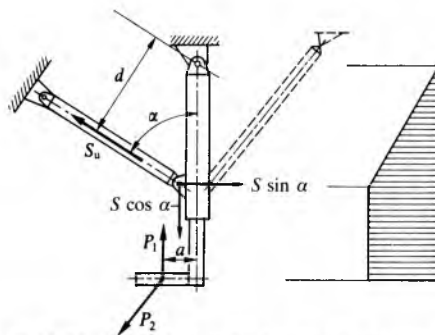
gdje je

$$W_f = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D} \approx 0,1 \frac{D^4 - d^4}{D}. \quad (48)$$

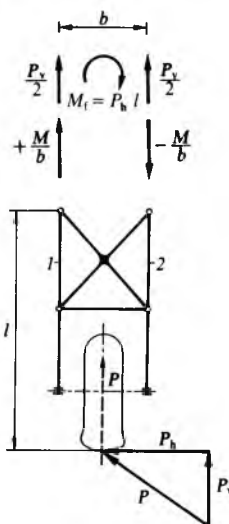
U gornjem je osloncu reakcija $R = P_1 l/b$. Djelovanjem sile P_2 javlja se moment $M_t = P_2 l$ i torzijski moment $M_t = P_2 a = \text{const}$. Prema tome bit će

$$\sigma_t = \frac{M_f}{W_f} = \frac{M_t}{0,1 \frac{D^4 - d^4}{D}}; \quad \sigma_t = \frac{M_t}{W_t} = \frac{M_t}{5D}. \quad (49)$$

Kad elastične noge stajnog trapa imaju upornicu (sl. 52), elastična noga i upornica zglobno su vezane s konstrukcijom aviona. Tada postoji ravnoteža momenata $P_1 a = S_u d$, pa je $S_u = P_1 a/d$.



Sl. 52. Sile na elastičnoj nozi stajnog trapa s upornicom



Sl. 53. Bočno opterećenje okvirne noge stajnog trapa

Budući da upornica leži u ravnini noge i njene osovine, ona ne utječe na djelovanje sile P_2 . Tu silu preuzima druga upornica smještena u ravnini okomitoj na prvu (crtkano na sl. 52).

Na sl. 53 prikazan je bočni kosi udar silom P na okvirnu nogu stajnog trapa. Horizontalna je komponenta te sile $P_h = P \cos \alpha$, a vertikalna $P_v = P \sin \alpha$. Na svaku nogu okvira djeluje polovica vertikalne sile $P_v/2$. Moment savijanja $M_f = P_h l$ uzrokuje u svakoj nozi silu M/b . Te su sile međusobno jednake po iznosu, ali suprotnog smjera. Prema tome,

$$\text{sila je u jednoj nozi } S_1 = \frac{P_v}{2} + \frac{M}{b}, \text{ a u drugoj } S_2 = \frac{P_v}{2} - \frac{M}{b}.$$

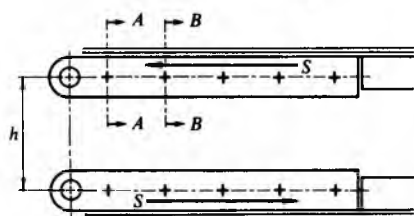
OKOVI SPOJA KRILA

Obično su krila spojena s centropplanom pomoću okova učvršćenih na ramenjaču krila, odnosno centropplana, i međusobno vezanih cilindričnim ili koničnim svornicima kao na sl. 54. Svornici su opterećeni aksijalnom silom $S = M_f/h$, gdje je M_f moment savijanja krila u ravnini spoja, a h razmak po visini među osima svornika. Smično je naprezanje u svorniku

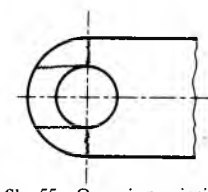
$$\tau_s = \frac{S}{nF} \leq \tau_{sd}, \tag{50}$$

gdje je S sila koja djeluje na svornik, n broj presjeka u kojima je svornik napregnut na odrez, F površina presjeka svornika, a τ_{sd} dopušteno smično naprezanje. Prema (50) potreban promjer svornika iznosi

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi n \tau_{sd}}}. \tag{51}$$



Sl. 54. Sile u okovu spoja krila



Sl. 55. Opasni presjeci uške okova krila

Kontrolu čvrstoće uške okova treba provesti s obzirom na opasne presjeka (sl. 55) i s obzirom na tlak na dosjednim površinama. Budući da se s dovoljnom točnošću može pretpostaviti da su svi vijci koji spajaju okov s ramenjačom podjednako opterećeni, pojedini će vijak biti opterećen silom S/n , gdje je S aksijalna sila u ramenjači, a n broj vijaka u spoju. To je ujedno i kriterij za dimenzioniranje potrebnih presjeka samog okova. Tako će npr. vijak u presjeku A-A na sl. 54 biti opterećen silom $5S/n$, u presjeku B-B silom $4S/n$ itd.

LIT.: G. Otto, Entwurf und Berechnung von Flugzeugen (Bd. I-IV). Volkmann, Berlin 1942. - C. H. Kan, Прочность самолета. Оборонгиз, Москва, 1946. - S. Milutinović, Konstrukcija aviona. Građevinska knjiga, Beograd 1970. - D. Stankov, Proračun avionskih konstrukcija. Naučna knjiga, Beograd 1971. - A. Hajer, G. Sachs, Flugmechanik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1980.

F. Hranuelli

PROSTORNO PLANIRANJE, planiranje uređenja većih izvangradskih područja da bi se ostvario optimalan razmještaj stanovništva i privrednih djelatnosti, te da bi se osiguralo svrsishodno iskorištenje zemljišta uz zaštitu okoliša i očuvanje estetskih i kulturnih vrijednosti. Prostorno planiranje razlikuje se od urbanističkog planiranja (v. *Urbanizam*).

Prostorno planiranje može obuhvatiti različite vrste i veličine teritorija, od urbaniziranih do nenaseljenih područja.

Najčešće se prostorni planovi izrađuju za područja koja se obično nazivaju regijama (regionalno planiranje), ali i za manja (subregije) i veća područja (cijele države). U praksi se prostorni planovi izrađuju za teritorije definirane upravnom podjelom (općine, skupine općina, provincije, pokrajine i sl.), jer donošenje tih planova spada u kompetenciju društveno-političkih zajednica. U nas je prostorno planiranje regulirano republičkim zakonima. Prema zakonu obavezni su prostorni planovi općina i republike, te prostorni planovi nacionalnih parkova.

U prvoj četvrtini XX. stoljeća počelo se uviđati da urbanističko planiranje gradova nije moguće bez sagledavanja razvoja šireg područja oko gradova, i to iz sljedećih razloga: a) brzina razvoja gradova i pretvaranje seoskih u gradska područja traži usmjeravanje razvoja sustava naselja i dekoncentraciju velikih gradskih aglomeracija; b) odnosi grada i njegova gravitacijskog područja postaju sve prisniji, jer su prometni sustavi i brzina komunikacija smanjili udaljenosti između grada i okolice; c) pojavili su se novi oblici iskorištavanja prostora izvangradskih područja, kao što je gradnja dalekovoda, cjevovoda, plovnih kanala, umjetnih jezera, retencija, velikih prometnih putova i terminala, industrijskih aglomeracija i dr.; d) sve se više razvija sekundarna urbanizacija (turistička naselja, područja kuća za odmor); e) sve je intenzivnije iskorištavanje rudnih nalazišta uz koje se pojavljuje problem sanacije degradiranog zemljišta; f) uvođenje novih tehnika u poljoprivredu unosi bitne promjene u načinu života na seoskim područjima, g) intenzivan proces napuštanja poljoprivrede i velike migracije, te povećanje udjela gradskog i nepoljoprivrednog stanovništva, demografski porast, itd.

Karakteristike prostornog planiranja jesu: društveno značenje, dugoročnost, ciljevi i korisnici prostornog planiranja, te stručna osposobljenost za izradbu prostornih planova.

Društveno planiranje. Spomenute pojave upozorile su na ograničenost prostora, koji se zbog toga danas smatra *društvenim dobrom* kojim se mora racionalno gospodariti. Danas prevladava shvaćanje da se *društveno planiranje* sastoji od tri sektora planiranja: prostornog, privrednog i socijalnog. Ta su tri sektora međuzavisna i moraju biti dobro koordinirana. Privredni i socijalni planovi predstavljaju program za prostorne planove, ali se oni provjeravaju prostornim mogućnostima.

Dugoročnost planova. Planska se projekcija proteže na razdoblje od 20 do 30 godina, što je izrazita značajka prostornog planiranja. Zbog toga se prostorni planovi smatraju razvojnim planovima za razliku od provedbenih urbanističkih planova (razdoblje od 5 godina). Prostor je nepromjenljivo dobro koje se može, promatrano dugoročno, »potrošiti« samo jednom, i to uz dugotrajan način upotrebe i dugotrajne promjene od kojih su mnoge ireverzibilne. Zbog toga su kratkoročni prostorni planovi bez pravog smisla, jer bi oni služili samo za legalizaciju utakmice u eksploataciji prostora i ne bi osiguravali pravi društveni interes.

Pesimizam prema dugoročnosti prostornih planova nema opravdanja, jer oni nisu statičan okvir realizacije. Oni se, naime, periodički noveliraju svake pete godine.

Cilj planiranja. Prostorno planiranje može imati jedan ili više ciljeva. Većinom prostorni planovi moraju biti kompleksni, iako se prostorni planovi za područja posebne namjene mogu smatrati specijaliziranim planovima. U svijetu je izrađeno mnogo regionalnih prostornih planova i to za potrebe turizma (npr. Languedoc-Roussillon u Francuskoj, Costa Brava u Španjolskoj, Mamaia u Rumunjskoj, Južni Jadran u Jugoslaviji) i za potrebe hidroenergetike i melioracije (npr. Tennessee Valley u SAD, dolina Durance u Francuskoj, hidroenergetski sustav Drave u Jugoslaviji). Takvi planovi imaju karakteristike sektorskih planova, ali oni dugoročno moraju biti ugrađeni u kompleksni prostorni plan.

Prema stupnju obveznosti prostorni planovi mogu biti indikativni ili imperativni. Indikativni se planovi provode stimulativnim, odnosno destimulativnim mjerama, a imperativni silom zakona.