



vazmfb.com/sa/

Strukturalna analiza

Vežbe 3

25.05.2020.

Katedra za vazduhoplovstvo
Mašinski fakultet
Univerziteta u Beogradu

Danilo M. Petrašinić
Nikola G. Raičević 



Sadržaj

- Podsećanje na vežbu 2
- Proračun poprečnog preseka krila/trupa



- U vežbi 2 su prikazani osnovni elementi konstrukcije krila/trupa.
- Date su preporuke pomoću kojih se usvajaju dimenzije elemenata krila/trupa.
- Prikazan je i postupak proračuna stvarne i potrebne površine krila/trupa, nakon čega je nacrtan poprečni presek sa svim elementima.



- Proračun poprečnog preseka krila koji je usvojen u prethodnim koracima se vrši uzimajući u obzir pojavu ondulacije polja oplata.
- Parametri neophodni za proračun su:
 - Površina uzdužnika polja S_{uzdi} ,
 - Težište uzdužnika na oplati z_i ,
 - Poluprečnik krivine polja R_i ,
 - Modul elastičnosti $E = 7 \cdot 10^5 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$,
 - Rastojanje između rebara ΔL .



- Sve potrebne veličine se izračunavaju prema izrazima:

$$S_{opi} = b \cdot \delta_{opl}, \quad S_i = S_{uzdi} + S_{opi}$$

$$S_{ui} = \sum_{i=1}^n S_i, \quad z_c = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot z_i}{S_{ui}}$$

$$I_{y1} = \sum_{i=1}^n S_i \cdot (z_i - z_c)^2, \quad \sigma_i = \frac{j \cdot M_{max}}{I_{y1}} \cdot (z_i - z_c)$$

$$\sigma_{sri} = \frac{\sigma_i + \sigma_{i+1}}{2}, \quad \sigma_{pi} = 3.6 \cdot E \left(\frac{\delta_{opl}}{b_i} \right)^2$$

$$\sigma_{Ri} = 0.3 \cdot E \left(\frac{\delta_{opl}}{R_i} \right), \quad b_{efi} = b_i \cdot \sqrt[3]{\frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{sri} - \sigma_{Ri}}} \leq b_i$$

- Veličine σ_{pi} , σ_{Ri} i b_{efi} odrediti samo za pritisnuta polja.



- Prethodno navedene veličine prikazati tabelarno.

Broj polja	1	...	n
S_{uzd} [cm ²]			
z_i [cm]			
R_i [cm]			
S_{opi} [cm ²]			
S_i [cm ²]			
$S_i \cdot z_i$ [cm ³]			
$z_i - z_c$ [cm]			
$S_i \cdot (z_i - z_c)^2$ [cm ⁴]			
σ_i [daN/cm ²]			
σ_{sri} [daN/cm ²]			
σ_{pi} [daN/cm ²]			
σ_{Ri} [daN/cm ²]			
b_{efi} [cm]			

z_c [cm]	I_{y1} [cm ⁴]



- Sada je potrebno izvršiti drugu aproksimaciju.
- Sve potrebne veličine se izračunavaju prema izrazima:

$$S_{opi} = b_{efi} \cdot \delta_{opl}, \quad S_i = S_{uzdi} + S_{opi}$$

$$S_{ui} = \sum_{i=1}^n S_i, \quad z_c = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot z_i}{S_{ui}}$$

$$I_{y2} = \sum_{i=1}^n S_i \cdot (z_i - z_c)^2, \quad \sigma_i = \frac{j \cdot M_{max}}{I_{y2}} \cdot (z_i - z_c)$$

$$\sigma_{sri} = \frac{\sigma_i + \sigma_{i+1}}{2}, \quad \sigma_{pi} = 3.6 \cdot E \left(\frac{\delta_{opl}}{b_i} \right)^2$$

$$\sigma_{Ri} = 0.3 \cdot E \left(\frac{\delta_{opl}}{R_i} \right)$$

$$\sigma_{kri} = \begin{cases} \sigma_{pi} + \frac{\sigma_{Ri}^2}{4\sigma_{pi}}; & \sigma_{Ri} \leq 2\sigma_{pi} \\ \sigma_{Ri}; & \sigma_{Ri} > 2\sigma_{pi} \end{cases}$$



- Prethodno navedene veličine prikazati tabelarno.
- Veličine σ_{pi} , σ_{Ri} , σ_{kri} i $\sigma_{sri}/\sigma_{kri}$ odrediti samo za pritisnuta polja.

Broj polja	1	...	n
S_{uzd} [cm ²]			
z_i [cm]			
R_i [cm]			
S_{opi} [cm ²]			
S_i [cm ²]			
$S_i \cdot z_i$ [cm ³]			
$z_i - z_c$ [cm]			
$S_i \cdot (z_i - z_c)^2$ [cm ⁴]			
σ_i [daN/cm ²]			
σ_{sri} [daN/cm ²]			
σ_{pi} [daN/cm ²]			
σ_{Ri} [daN/cm ²]			
σ_{kri} [daN/cm ²]			
$\sigma_{sri}/\sigma_{kri}$			

z_c [cm]	I_{y2} [cm ⁴]



Tangencijalni naponi kod krila

- Da bi se izvršio proračun tangencijalnih napona kod krila, neophodno je odrediti tokove transverzalnih sila kao i tokove pri uvijanju.
- Tokovi transverzalnih sila t_{zi} se određuju uz pomoć sledećih izraza:

$$S_{xi} = S_i \cdot (z_i - z_c), \quad t_{oi} = -\frac{j \cdot T_{zmax}}{I_{y1}} \cdot S_{xi},$$

$$t_{zi} = t_1 + t_2 + t_{oi}$$

- Vrednosti t_1 i t_2 se dobijaju iz sistema jednačina:

$$-t_1 \cdot \varphi_{11} + t_2 \cdot \varphi_{12} = \varphi_{10}$$

$$t_1 \cdot \varphi_{21} - t_2 \cdot \varphi_{22} = \varphi_{20}$$



Tangencijalni naponi kod krila

- Parametri φ se određuju na osnovu sledećih izraza:

$$\varphi_{10} = \frac{O_1}{\delta \cdot G} \sum_1^n t_{oi}, \quad \varphi_{20} = \frac{O_2}{\delta \cdot G} \sum_2^n t_{oi},$$

$$\varphi_{11} = \frac{O_1}{\delta \cdot G}, \quad \varphi_{22} = \frac{O_2}{\delta \cdot G}, \quad \varphi_{12} = \varphi_{21} = \frac{h_1}{\delta \cdot G}$$

gde su O_1 i O_2 obimi kontura a $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ za $\nu = 0.3$.

- Sve vrednosti prikazati tabelarno.



Tangencijalni naponi kod krila

- Moment uvijanja kao i tokovi prilikom uvijanja se izračunavaju uz pomoć sledećih izraza:

$$M_u = C_m \cdot q \cdot \int_0^{b/2} l^2 dy$$

$$A_1 = \varphi_{22} \cdot S_1 + \varphi_{12} \cdot S_2$$

$$A_2 = \varphi_{21} \cdot S_1 + \varphi_{11} \cdot S_2$$

$$t_{t1} = \frac{A_1 \cdot M_u}{2 \cdot (S_1 \cdot A_1 + S_2 \cdot A_2)}$$

$$t_{t2} = \frac{A_2 \cdot M_u}{2 \cdot (S_1 \cdot A_1 + S_2 \cdot A_2)}$$

$$t_{ti} = t_{t1} + t_{t2}$$



Tangencijalni naponi kod krila

- Ukupni tok i stvarni tangencijalni napon se izračunava na sledeći način:

$$t_i = t_{zi} + t_{ti}, \quad \tau_i = \frac{t_i}{\delta}$$

- Kritični tangencijalni naponi se određuju uz pomoć sledećih izraza:

$$\tau_{pi} = 4.85 \cdot E \cdot \left(\frac{\delta_i}{b_i} \right)^2$$

$$\tau_{Ri} = 0.1 \cdot E \cdot \frac{\delta_i}{R_i} + 5 \cdot E \cdot \left(\frac{\delta_i}{\Delta l} \right)^2$$

$$\tau_{kri} = \begin{cases} \tau_{pi} + \frac{\tau_{Ri}^2}{4\tau_{pi}}; & \tau_{pi} \leq 2\tau_{Ri} \\ \tau_{Ri}; & \tau_{pi} > 2\tau_{Ri} \end{cases}$$



Tangencijalni naponi kod krila

- Prethodno navedene veličine prikazati tabelarno.
- Veličine τ_{pi} , τ_{Ri} , τ_{kri} i τ_i/τ_{kri} odrediti samo za pritisnuta polja.

Broj polja	1	...	n
$S_i \cdot (z_i - z_c)$ [cm ³]			
S_{xi} [cm ³]			
t_{oi} [daN/cm]			
t_{zi} [daN/cm]			
t_{ti} [daN/cm]			
t_i [daN/cm]			
τ_i [daN/[cm ²]			
τ_{pi} [daN/cm ²]			
τ_{Ri} [daN/cm ²]			
τ_{kri} [daN/cm ²]			
τ_i/τ_{kri}			



- Proračun poprečnog preseka trupa koji je usvojen u prethodnim koracima se vrši uzimajući u obzir pojavu ondulacije polja oplata.
- Parametri neophodni za proračun su:
 - Površina uzdužnika polja S_{uzdi} ,
 - Težište uzdužnika na oplati z_i ,
 - Poluprečnik krivine polja R_i ,
 - Modul elastičnosti $E = 7 \cdot 10^5 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$,
 - Rastojanje između okvira ΔL .



- Sve potrebne veličine se izračunavaju prema izrazima:

$$S_{opi} = b \cdot \delta_{opl}, \quad S_i = S_{uzdi} + S_{opi}$$

$$S_{ui} = \sum_{i=1}^n S_i, \quad z_c = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot z_i}{S_{ui}}$$

$$I_{y1} = \sum_{i=1}^n S_i \cdot (z_i - z_c)^2, \quad \sigma_i = \frac{j \cdot M_{max}}{2 \cdot I_{y1}} \cdot (z_i - z_c)$$

$$\sigma_{sri} = \frac{\sigma_i + \sigma_{i+1}}{2}, \quad \sigma_{pi} = 3.6 \cdot E \left(\frac{\delta_{opl}}{b_i} \right)^2$$

$$\sigma_{Ri} = 0.3 \cdot E \left(\frac{\delta_{opl}}{R_i} \right), \quad b_{efi} = b_i \cdot \sqrt[3]{\frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{sri} - \sigma_{Ri}}} \leq b_i$$

- Veličine σ_{pi} , σ_{Ri} i b_{efi} odrediti samo za pritisnuta polja.



- Prethodno navedene veličine prikazati tabelarno.

Broj polja	1	...	n
S_{uzd} [cm ²]			
z_i [cm]			
R_i [cm]			
S_{opi} [cm ²]			
S_i [cm ²]			
$S_i \cdot z_i$ [cm ³]			
$z_i - z_c$ [cm]			
$S_i \cdot (z_i - z_c)^2$ [cm ⁴]			
σ_i [daN/cm ²]			
σ_{sri} [daN/cm ²]			
σ_{pi} [daN/cm ²]			
σ_{Ri} [daN/cm ²]			
b_{efi} [cm]			

z_c [cm]	I_{y1} [cm ⁴]



- Sada je potrebno izvršiti drugu aproksimaciju.
- Sve potrebne veličine se izračunavaju prema izrazima:

$$S_{opi} = \frac{b_{efi-1} + b_{efi}}{2} \cdot \delta_{opl}, \quad S_i = S_{uzdi} + S_{opi}$$

$$z_o = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot (z_i - z_c)}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

$$I_{y2} = \sum_{i=1}^n S_i \cdot (z_i - z_c - z_o)^2, \quad \sigma_i = \frac{j \cdot M_{max}}{2 \cdot I_{y2}} \cdot (z_i - z_c - z_o)$$

$$\sigma_{sri} = \frac{\sigma_i + \sigma_{i+1}}{2}, \quad \sigma_{pi} = 3.6 \cdot E \left(\frac{\delta_{opl}}{b_i} \right)^2$$

$$\sigma_{Ri} = 0.3 \cdot E \left(\frac{\delta_{opl}}{R_i} \right)$$

$$\sigma_{kri} = \begin{cases} \sigma_{pi} + \frac{\sigma_{Ri}^2}{4\sigma_{pi}}; & \sigma_{Ri} \leq 2\sigma_{pi} \\ \sigma_{Ri}; & \sigma_{Ri} > 2\sigma_{pi} \end{cases}$$

Proračun poprečnog preseka trupa



- Prethodno navedene veličine prikazati tabelarno.
- Veličine σ_{pi} , σ_{Ri} , σ_{kri} i $\sigma_{sri}/\sigma_{kri}$ odrediti samo za pritisnuta polja.

Broj polja	1	...	n
S_{uzd} [cm ²]			
z_i [cm]			
R_i [cm]			
S_{opi} [cm ²]			
S_i [cm ²]			
$S_i \cdot (z_i - z_c)$ [cm ³]			
$S_i \cdot (z_i - z_c - z_o)^2$ [cm ⁴]			
σ_i [daN/cm ²]			
σ_{sri} [daN/cm ²]			
σ_{pi} [daN/cm ²]			
σ_{Ri} [daN/cm ²]			
σ_{kri} [daN/cm ²]			
$\sigma_{sri}/\sigma_{kri}$			

z_o [cm]	I_{y2} [cm ⁴]



Tangencijalni naponi kod trupa

- Stvarni tangencijalni napon se izračunava na sledeći način:

$$S_{yi} = \sum_{i=1}^n S_i \cdot (z_i - z_c), \quad \tau_i = -\frac{j \cdot T_{max}}{I_{y1} \cdot \delta_{opl}} \cdot S_{yi}$$

- Kritični tangencijalni naponi se određuju uz pomoć sledećih izraza:

$$\tau_{pi} = 4.85 \cdot E \cdot \left(\frac{\delta_i}{b_i}\right)^2$$

$$\tau_{Ri} = 0.1 \cdot E \cdot \frac{\delta_i}{R_i} + 5 \cdot E \cdot \left(\frac{\delta_i}{\Delta l}\right)^2$$

$$\tau_{kri} = \begin{cases} \tau_{pi} + \frac{\tau_{Ri}^2}{4\tau_{pi}}; & \tau_{pi} \leq 2\tau_{Ri} \\ \tau_{Ri}; & \tau_{pi} > 2\tau_{Ri} \end{cases}$$



Tangencijalni naponi kod trupa

- Prethodno navedene veličine prikazati tabelarno.
- Veličine τ_{pi} , τ_{Ri} , τ_{kri} i τ_i/τ_{kri} odrediti samo za pritisnuta polja.

Broj polja	1	...	n
$S_i \cdot (z_i - z_c)$ [cm ³]			
S_{yi} [cm ³]			
τ_i [daN/cm ²]			
τ_{pi} [daN/cm ²]			
τ_{Ri} [daN/cm ²]			
τ_{kri} [daN/cm ²]			
τ_i/τ_{kri}			



Hvala na pažnji!