

NAPREZANJA I DEFORMACIJE OREBRENOG MEMBRANSKOG ELEMENTA PRETVORNIKA TLAKA FLUIDA S ELEKTROOTPORNIM MJERNIM TRAKAMA

STRESSES AND STRAINS IN RIBBED DIAPHRAGM-TYPE FLUID PRESSURE TRANSDUCER WITH ELECTRICAL-RESISTANT MEASURE GAGES

UDK 532/533:531.8

Prethodno priopćenje
Preliminary communication

Sažetak

Mjerno osjetilo svakog pretvornika tlaka fluida s elektrootpornim mjernim trakama, koje se koristi u brodskim postrojenjima, najkritičnija je njegova mehanička komponenta. U radu je dana usporedna analiza naprezanja i deformacija jednog novog konstrukcijskog rješenja mjernog osjetila, oblika kružne membrane ojačane koncentričnim rebrima zbog povećanja krutosti pri savijanju. Kako egzaktno rješenje ne postoji, na osnovi analitičkog rješenja koje se temelji na metodi početnih parametara, te odgovarajućeg programa za računalo, dobivene su ekstremne vrijednosti naprezanja i progibi membrane. Kao eksperimentalna metoda korištena je fotoelastična metoda zamrzavanja naprezanja posebno izrađenog i opterećenog modela. Potvrđena je valjanost razmatranog konstrukcijskog rješenja i predložene proračunske metode.

Ključne riječi: naprezanja i deformacije, orebreni membranski element, pretvornik tlaka fluida

Summary

The sensing element of any fluid pressure transducer fitted with electrical-resistant measure gages employed in onboard systems, is its most critical mechanical component.

This paper is concerned with a comparative analysis of stresses in a new designed sensing element. It is a circular diaphragm strengthened with concentric ribs in order to increase bending rigidity. Since there is no exact solution to the problem, analytical solution has been based on the method of initial parameters and appropriate programmed designed for PC. In this way extreme values of stresses and deflection have been obtained. The photoelastic frozen stress method

of specially made and loaded model has been employed. The validity of the considered constructive solution and suggested calculating method has been confirmed.

Key words: stresses and strains, ribbed diaphragm, fluid pressure transducer.

1. Uvod Introduction

Pretvornik tlaka fluida s elektrootpornim mjernim trakama je uređaj koji transformira ulaznu mehaničku energiju tlaka u ekvivalentni električni signal za mjerenje i/ili kontrolu ulazne veličine, te kao takav nalazi široku primjenu u brodskim postrojenjima.

Osnovno je pitanje koje se postavlja pri konstrukciji pretvornika tlaka fluida izbor oblika i dimenzija njegovog mjernog osjetila, odnosno elastičnog elementa. Nije moguće postaviti općenita pravila koja u potpunosti određuju konstrukcijske parametre ove najkritičnije mehaničke komponente, zbog utjecaja velikog broja čimbenika koji se javljaju u najrazličitijim kombinacijama. Bitan zahtjev koji se postavlja elastičnom elementu je konstantan proporcionalan omjer između elastičnih deformacija i opterećenja, pa je potpuna spoznaja o stanju naprezanja i deformacije pod određenim opterećenjem izvanredno važna za konstruktora.

U ovom je radu provedeno istraživanje naprezanja i deformacije jednog novog konstrukcijskog rješenja elastičnog membranskog elementa pretvornika tlaka fluida. Poznato je da su karakteristike kružne membrane dobra tehnološka, mehanička i mjerna svojstva, a u ovom je slučaju ona ojačana s tri prstenasta koncentrična rebra zbog povećanja krutosti pri savijanju. Kako egzaktno rješenje takvog problema u teoriji elastičnosti ne postoji, a numerička su rješenja složena predlaže se analitičko rješenje. Ono se zasniva na

* doc. dr. sci. Zlatan Kulenović
Pomorski fakultet Sveučilišta u Splitu

** mr. sci. Maja Krčum
Pomorski fakultet Sveučilišta u Splitu

metodi početnih parametara i pogodno je za inženjersku praksu. Rezultati proračuna ekstremnih naprezanja i progiba membrane, uspoređeni su sa eksperimentalnim rezultatima dobivenim fotoelastičnom metodom zamrzavanja naprezanja posebno izrađenog i opterećenog modela od Araldita B.

2. Analitičko rješenje Analytical Solution

Stanje naprezanja i deformacije u bilo kojoj točki razmatranog orebrenog membranskog elementa (sl. 1.) određeno je vektorom stanja, koji je u matricnom obliku:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdje je:

$$X_1 = \frac{q}{r}; \quad X_2 = \frac{M_r}{D}; \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

Površina membrane, rebrima je podijeljena na koncentrična područja, pa se izraz (1) može prikazati na sljedeći način:

$$X_{i2} = L_i X_{i1} + R_i \quad (2)$$

gdje je:

X_{i1}, X_{i2} - vektor stanja na početku odnosno na kraju i -tog područja;

$$L_i = \begin{bmatrix} \Psi_{\theta\theta} & \Psi_{\theta M} \\ \Psi_{r\theta} & \Psi_{rM} \end{bmatrix}; \quad R_i = -\frac{\dot{p}}{Dr_{i2}^2} \begin{bmatrix} \pi\lambda^2 i \Psi_{\theta Fi} & \Psi_{\theta rp} \\ \pi\lambda^2 i \Psi_{rFi} & \Psi_{r rp} \end{bmatrix}$$

r_{i1}, r_{i2} - početni odnosno krajnji radijus i -tog područja;

$$\lambda_i = \frac{r_{i1}}{r_{i2}}; \quad \Psi = \Psi(\lambda_i) \quad [6].$$

Ako promatrano područje i počinje rebrom, tada vrijedi:

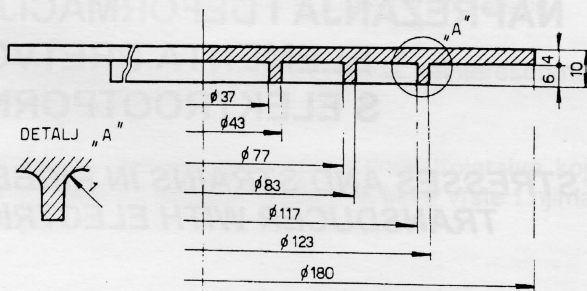
$$X_{i1} = L_R X_{(i-1)2} \quad (3)$$

gdje je:

$X_{(i-1)2}$ - vektor stanja na kraju prethodnog ($i-1$) područja

$$L_R = \begin{bmatrix} 10 \\ G1 \end{bmatrix}; \quad G = \frac{EI}{Dr_R}; \quad I = \frac{bH}{4} \left[\frac{H^2}{3} + (H+h)^2 \right]$$

Ovdje se pretpostavlja da visina rebra nije velika u usporedbi s njegovom širinom odnosno debljinom membrane, kao i to da je čvrstoća na istezanje rebra znatno manja od iste čvrstoće membrane. Ovo znači da je rebro prsten čiji se poprečni presjek ne deformira pri opterećenju.



Slika 1. Orebreni membranski element
Figure 1. Ribbed diaphragm

Ako su obje komponente vektora stanja u početnoj točki prvog područja poznate (kao početni parametri), moguće je pomoću izraza (2) i (3) dobiti vrijednosti vektora stanja X u svim točkama membrane. No, u razmatranom slučaju to nije ispunjeno, pa se predlaže zapis vektora stanja X , izraz (1), na sljedeći način:

$$X = \bar{X} \cdot K + \bar{X} \quad N \quad (4)$$

gdje je:

\bar{X} - prvi vektor stanja koji ne uzima u obzir vanjsko opterećenje ($R_i = 0$)

\bar{X} - drugi vektor stanja pri vanjskom opterećenju

K - nepoznati koeficijent koji se određuje iz rubnih uvjeta na vanjskoj konturi membrane

Na temelju komponenti X_1 i X_2 ovako definiranog vektora stanja dobivaju se ekstremne vrijednosti naprezanja u radijalnom i cirkularnom smjeru orebrenog membranskog elementa, izražene u nedimenzionalnom obliku:

$$\frac{\sigma_r}{p} = A \cdot X_2; \quad \frac{\sigma_\theta}{p} = A \cdot [(1-\nu^2) X_1 + \nu X_2] \quad (5)$$

$$\text{gdje je: } A = \frac{6D}{ph^2}$$

Veličina progiba, koja karakterizira deformacije elastične površine orebrenog membranskog elementa, na kraju razmatranog i -tog područja izražena preko njegove veličine na početku tog područja, u nedimenzionalnom obliku glasi:

$$\frac{w_{i2}}{h} = B \cdot \left[w_{il} - r_{i2}^2 \left((X_1)_{i1} \Psi_{w9} + (X_2)_{i1} \Psi_{wM} \right) \right] + B \cdot C$$

gdje je:

w_{i1} ; w_{i2} - progib na početku odnosno kraju i -tog područja

$$B = \frac{1}{h}; C = \frac{P}{D} (\pi \lambda_i \Psi_{wF} - \Psi_{wp})$$

Pri ovom razmatranju pretpostavlja se da tlak fluida ima konstantnu vrijednost po cijeloj površini membrane.

Rubna naprezanja i progibi, izrazi (5) i (6), određeni su na osnovi odgovarajućeg programa za računalno, u ovisnosti od radijusa membrane. Pri tome je:

$$\bar{X}_{11} = \left[\frac{1+v}{2} \right]; \bar{X} = 0 - \text{početna točka (sredina)}$$

membrane ($r_{11} = 0$);

$$\mu = 0.48; E = 17.87 \text{ MPa}$$

$$\mu = 0.48; E = 17.87 \text{ MPa} - \text{Araldit B,}$$

$$t_2 = 150^\circ \text{C (baždarenje)}$$

$$K = - \frac{\left(\bar{X}_1 \right)_{42}}{\left(X_1 \right)_{42}} - \text{vanjski rub membrane}$$

je ukliješten ($r_{42} = 75 \text{ mm}$).

3. Eksperimentalno rješenje Experimental Solution

Model orebrenog membranskog elementa (sl. 1.) izrađen je procesom tople polimerizacije od epoksidne smole Araldit B (Ciba AG-Švicarska), kojoj je dodan otvrdivač HT 901 (anhidrid ftalne kiseline) u omjeru 100:30. Nakon odgovarajućega temperaturno-polimerizacijskog ciklusa u električnoj peći, model je mehanički obrađen na približne dimenzije, te temperiran na 150°C radi uklanjanja zaostalih naprezanja. Poslije polaganog hlađenja do sobne temperature, pristupilo se završnoj obradi tokarenjem uz propisane režime na konačne dimenzije. U posebno konstruiranom i precizno izrađenom uređaju, model je oslonjen i opterećen na način koji odgovara radnim uvjetima. Nakon zagrijavanja u peći do temperature zamrzavanja od 150°C , koja je zadržana 2 sata, model je pod opterećenjem hlađen 5°C/sat do sobne temperature. U njemu su na taj način trajno vezane deformacije, a time i fotoelastični učinak. Razrezivanje

modela u simetrične slojeve i podslojeve, u čijim ravninama leže po dva glavna naprezanja, učinjeno je na glodalici uz propisane režime. Slojevi su zatim držani 48 sati na temperaturi od 60°C zbog otklanjanja rubnog učinka, te snimljeni u svjetlom i tamnom polju kružno polariziranog svjetla.

Slika 2.¹, pokazuje snimku dijametralno izrezanog radijalnog sloja. Slika 3.¹ daje snimku jednog od cirkularnih podslojeva koji sadrži prstenasto rebro najvećeg radijusa.



Slika 2. Radijalni sloj, svjetlo polje
Figure 2. Radial slice, light field

U radijalnom sloju, glavna jednačba fotoelastimetrije glasi:

$$\sigma_2 - \sigma_3 = \frac{f_\sigma}{b_r} N_r \quad (7)$$

a u cirkularnim slojevima njezin je oblik:

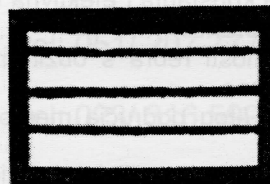
$$\sigma_2 - \sigma_3 = \frac{f_\sigma}{b_\phi} N_\phi \quad (8)$$

Ekstremne vrijednosti radijalnih i cirkularnih naprezanja u nedimenzionalnom obliku, dobivene su na temelju izraza (7) i (8), uvrštavanjem: $\sigma_1 = \sigma_r$; $\sigma_2 = \sigma_\phi$; $\sigma_3 = 0$ (naprezanje okomito na slobodni rub) i dijeljenjem sa p . Izmjerene vrijednosti progiba w također su izražene nedimenzionalno dijeljenjem s h , pri čemu je:

$$f_\sigma = 0.28 \text{ N/mm} - \text{Araldit B,}$$

$$t_2 = 150^\circ \text{C (baždarenje), } P = 3 \text{ kPa,}$$

$$b_r = 4 \text{ mm; } b_\phi = 3 \text{ mm; } h = 4 \text{ mm.}$$



Slika 3. Cirkularni sloj, tamno polje
Figure 3. Circular slice, dark field

¹Snimljeno u laboratoriju za Nauku o čvrstoći, FSB, Zagreb

5. Analiza rezultata i zaključak Analysis of Results and Conclusion

Na temelju analitičkih i eksperimentalnih rezultata, prikazane su krivulje radijalnih i cirkularnih naprezanja te progiba orebrenog membranskog elementa, slika (4).

Krivulja se radijalnih naprezanja dobivena analitički mijenja od vrijednosti 60 (sredina membrane) do maksimalne vrijednosti - 206.3 (vanjski rub membrane). Singularna točka nalazi se na radijusu 53 mm. Skokovite promjene nastaju na mjestima gdje su raspoređena rebra. Eksperimentalna krivulja u potpunosti prati analitičku krivulju s tim da su eksperimentalni rezultati nešto manji od analitičkih.

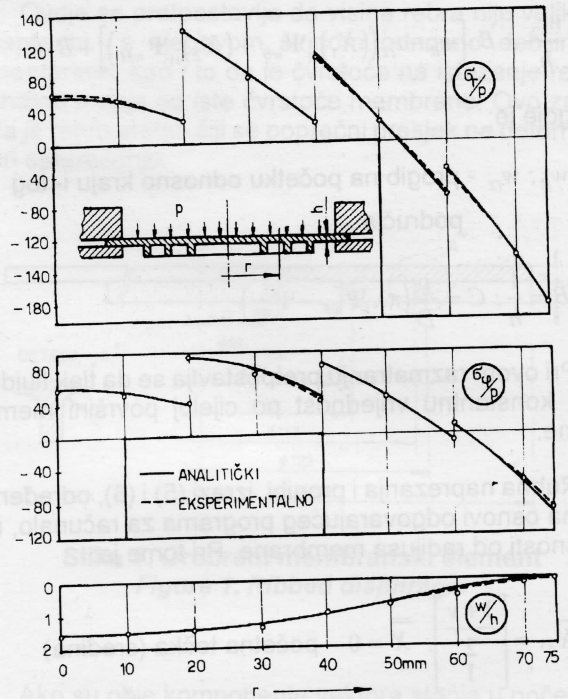
Krivulja cirkularnih naprezanja dobivena analitički, mijenja se od vrijednosti 60 (sredina membrane) do maksimalne vrijednosti - 98.8 (vanjski rub membrane). Singularna točka nalazi se na radijusu 59 mm. Skokovite se promjene pojavljuju na mjestima rebara. Eksperimentalna krivulja gotovo idealno prati analitičku krivulju. I ovdje su na pojedinim mjestima analitički rezultati nešto veći od eksperimentalnih.

Elastične površine definirane progibima, dobivene analitički i eksperimentalno, kvalitativno i kvantitativno se podudaraju, pri čemu je ekstremna vrijednost progiba 1.6 (sredina membrane).

Rezultati provedenog istraživanja pokazuju da razmatrana konstrukcija orebrenog membranskog elementa ostaje u elastičnom području i pri visokim tlakovima fluida, zahvaljujući povećanju krutosti na savijanje. To je postignuto cirkularnim ojačanjem elastičnog elementa prstenastim rebrima. Utjecaj rebara, pri tome, unosi samo lokalne poremećaje u raspodjelu naprezanja, što ne kvari traženu linearnu karakteristiku membranskog elementa. Potvrđena je jednakost po veličini i predznaku radijalnih i cirkularnih naprezanja u sredini membrane, te promjena njihovog predznaka približavanjem njezinom vanjskom rubu. Pri tome se uočava da razlike između analitičkih i eksperimentalnih rezultata nikada ne prelaze iznos od 10 %, pri čemu su eksperimentalni rezultati redovito manji. Iz svega se zaključuje da je predloženo konstrukcijsko rješenje elastičnog elementa u potpunosti ispravno, a predložena i izvedena analitička metoda dovoljno točna za inženjerske proračune ovakvih i sličnih izvedbi cirkularno ojačanih konstrukcija.

Znakovi/Symbols

- b_r, b_ϕ - širina radijalnog odnosno cirkularnog sloja
- D - krutost na savijanje membrane
- E - Youngov modul elastičnosti (efektivna vrijednost)
- f_σ - fotoelastična konstanta (efektivna vrijednost)
- h - debljina membrane
- I - moment tromosti rebara s obzirom na elastičnu površinu membrane
- L_i, L_R - matrica i-tog područja membrane odnosno rebara
- M_r - moment savijanja u radijalnom smjeru membrane
- N_r, N_ϕ - red izokrome na rubu radijalnog odnosno cirkularnog sloja
- p - tlak fluida
- R_i - matrica opterećenja i-tog područja



Slika 4. Raspodjela naprezanja i progiba orebrenog membranskog elementa
Figure 4. Distribution of stresses and deflections of ribbed diaphragm

- r, R_R - radijus membrane odnosno rebara
- t_z - temperatura zamrzavanja
- X - progib membrane
- vektor stanja
- kut zakreta na elastičnu površinu membrane
- ν - Poissonov koeficijent
- σ_r, σ_ϕ - normalno radijalno odnosno cirkularno naprezanje
- Ψ - funkcija geometrije membrane

Literatura/References

- [1] Alfirević, I., Jecić S.: Fotoelasticimetrija, FSB Zagreb, Zagreb 1982.
- [2] Biderman V. L.: Mehanika tankostennih konstrukcij, Mašinstroenie, Moskva, 1977.
- [3] Bojaršinov, S. V.: Osnovi strojiteljnoi mehaniki mašin, Mašinstroenie, Moskva, 1973.
- [4] Dally, I. W., Riley, W. F.: Experimental Stress Analysis, Mc Graw-Hill, Singapore, 1987.
- [5] Fopl, L., Monch, E.: Praktische Spannungsoptik, Springer Verlag - Berlin- Heidelberg-New York, 1972.
- [6] Kulenović, Z.: Komparativna analiza orebrenih kružnih ploča metodama početnih parametara i fotoelasticimetrije, Strojarstvo 26 (1984.)4, p.p. 207-213
- [7] Kulenović, Z.: Experimental Stress Analysis in Circular Strengthened Plates, Proceedings of Gamm congress, S2-20, Dubrovnik, 1985.
- [8] Malikov, G. F. i dr.: Rasčeti uprugih tenzometričkih elemenata, Mašinstroenie, Moskva 1964.
- [9] Osadčij, E.P. i dr.: Projektirovanie datčikov dlja izmerenija mehaničkih veličin, Mašinstroenie, Moskva 1979.
- [10] Schulze, K.: Eksperimentelle Messtechnik in Maschinen und Stahlbau, Veb Verlag Technik, Berlin 1988.
- [11]*: Strain Gage Based Transducers, Their Designed and Constructions, Measurements Group, Inc., Raleigh, 27611, 1988.

Rukopis primljen: 12.6.1998.