

STUDIUL ANALITIC AL STĂRILOR DE SOLICITARE ÎNTR-O PLACĂ CIRCULARĂ PLANĂ, CU EXTINDERE RESTRÂNSĂ ȘI UN RACORD CENTRAL

ANALYTICAL STUDY OF STRESS STATES IN A PLANE CIRCULAR PLATE WITH RESTRICTED EXPANSION, AND A CENTRAL CONNECTION

Gheorghe Cosmin CIOCOIU ¹, Radu I. IATAN ¹,
Nicoleta SPOREA ¹, Ion DURBACĂ ¹, Ionuț CHERCIU ¹

¹⁾ National University of Sciences and Technology Polytechnic Bucharest
cgcosmin@gmail.com; iatan.radu@gmail.com; nsporea@yahoo.com; ion.durbaca@yahoo.com;
cherciunionut13@gmail.com

Rezumat. În structura echipamentelor pentru procese industriale există combinații între plăci plane și racorduri pentru alimentarea cu substanțe destinate prelucrării sau evacuării acestora. În articolul de față se are în vedere o combinație între o placă circulară cu extindere redusă, fixată la o manta cilindrică și un racord cilindric, poziționat central. În această situație se propune elaborarea unui studiu analitic pentru evaluarea stărilor de tensiuni în îmbinările respective.

Cuvinte cheie: Discontinuități geometrice, stări de tensiuni

Summary. In the structure of the equipment for industrial processes there are combinations between flat plates and connections for the supply of substances intended for their processing or evacuation. The present paper considers a combination between a circular plate with reduced expansion, fixed to a cylindrical shell and a cylindrical connection, positioned centrally. In this situation, it is proposed to develop an analytical study for the evaluation of the stress states in the respective joints.

Key words: Geometrical discontinuities, stress states

INTRODUCERE

Dezvoltarea recunoscută a echipamentelor industriilor de proces implică structuri complexe, în cadrul cărora se îmbină diverse geometrii ale elementelor componente. Printre acestea se enumeră și plăci plane, circulare, cu extindere mare sau mică, fixate la elemente geometrice cilindrice, cum este cazul, de față. Astfel de situații implică concentrări de tensiuni în zonele de îmbinare a diferitelor elemente constructive [1 - 18].

În structura echipamentelor industriale se întâlnesc, nu de puține ori, combinații între racorduri centrale pentru alimentarea cu fluide (lichide sau gaze) și plăci plane circulare, îmbinate, la rândul lor, cu corpuri cilindrice.

În cazul de față, autorii își propun să stabilească modalitatea practică pentru evaluarea corespunzătoare a stărilor de tensiuni în zonele cu discontinuități geometrice.

IPOTEZE DE STUDIU

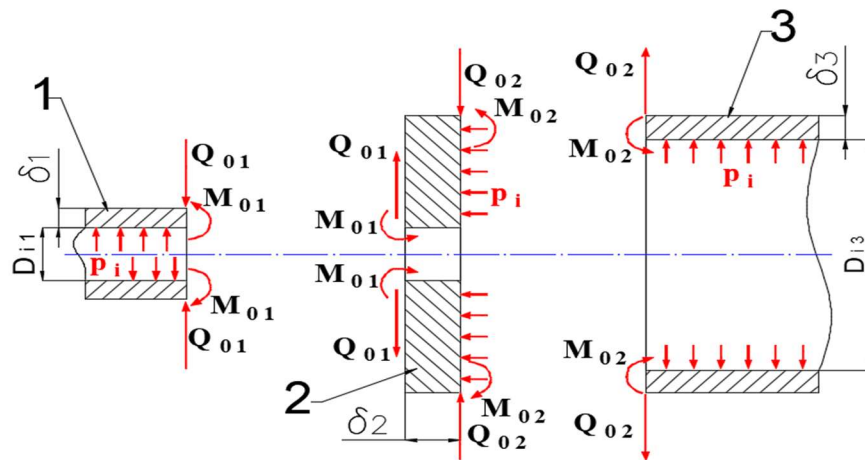


Fig. 1. Schema separării elementelor îmbinării racordului central cu o placă circulară plană, fixată la un corp cilindric

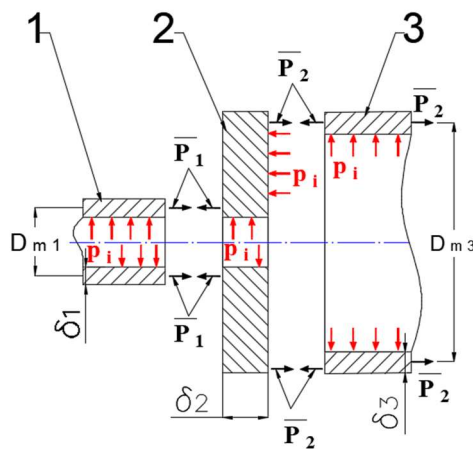


Fig. 2. Schema cu forțele axiale unitare \bar{P}_1 , \bar{P}_2 , distribuite pe circumferințele mediale ale cilindrilor 1 și 3

Notă: Modelul teoretic adoptat (fig. 1) are o combinație de genul prezentat anterior (placă circulară plană cu extindere restrânsă, o manta exterioară de formă cilindrică și un racord central).

Pentru a se putea evalua stările de solicitare în zonele cu discontinuități ale structurii analizate în cazul de față, se au în vedere unele ipoteze de studiu, adecvate. Astfel:

a) Elementele constructive se realizează din material metalic, omogen, îmbinate prin sudare (valorile modulelor elasticității longitudinale se pot considera diferite sau egale: $E_1 = E_2 = E_3 = E$; valorile coeficienților contracției transversale pot fi apreciate ca diferite sau egale: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu$).

b) Solicitarea se consideră în domeniul elastic.

c) Temperaturile de lucru și presiunile se apreciază ca fiind diferite, în cadrul relațiilor de

Studiul analitic al stărilor de solicitare într-o placă circulară plană, cu extindere restrânsă, și un racord central

calcul, pentru elementele cilindrice considerate. Se menționează, totodată, că temperaturile și presiunile se consideră constante în lungul elementelor cilindrice.

Dacă se apreciază că diferențele sunt ne semnificative, în structura calculului se egalează ușor valorile gradientilor termici ($\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T_3 = \Delta T$). În această ordine de idei se pot lua în calcul factorii de deformare termică $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4$, cu valori diferite pentru materialele de construcție sau pentru regimuri termice deosebite.

d) Placa plată se consideră, în cazul de față, cu extindere mică (nu se neglijează efectele de capăt).

e) Elementele constructive 1 și 3 se consideră cu lungimi mai mari decât valorile semiundelor: $h_1 < \ell_{sc1} \approx 1,77 \cdot \sqrt{D_{m1} \cdot \delta_1}$; $h_3 < \ell_{sc3} \approx 1,77 \cdot \sqrt{D_{m3} \cdot \delta_3}$; h_1, h_3 – lungimile/înălțimile elementelor constructive 1 și 3; l_{sc1}, l_{sc3} – lungimile semiundelor celor două porțiuni cilindrice 1 și 3; D_{m1}, D_{m3} – diametrele medii ale elementelor 1 și 3 ($D_{m1} = D_{i1} + \delta_1$; $D_{m3} = D_{i3} + \delta_3$; $D_{i1} = D_{i3}$ – diametrele interioare ale tuburilor 1 și 3; δ_1, δ_3 – grosimile tuburilor 1 și 3;

f) Se consideră că placa plană 2 (fig. 1) are grosimea δ_2 mai mare decât grosimile elementelor cilindrice 1 și 3.

ECUAȚII DE CONTINUITATE A DEFORMAȚIILOR. SARCINI DE LEGĂTURĂ

Notații:

Q_{01}, Q_{02} – forțe tăietoare unitare de legătură (fig. 1); M_{01}, M_{02} – momente încovoietoare radiale, unitare (fig. 1); $R_{m1} = 0,5 \cdot (D_{i1} + \delta_1) = R_{m3}$; \bar{P}_1, \bar{P}_2 – forțe axiale unitare distribuite în lungul circumferințelor mediane ale elementelor cilindrice 1 și 3 ($\bar{P}_2 = R_{m3} \cdot p_i / 2$; $\bar{P}_1 = R_{m1} \cdot p_i / 2$) – fig. 2; p_i – presiune interioară distribuită în interiorul elementelor cilindrice 1 și 3, respectiv pe suprafața interioară a plăcii 2; k_j, \mathfrak{R}_j – factori de atenuare a intensității sarcinilor de legătură în lungul virolelor cilindrice corespunzătoare, respectiv rigiditățile cilindrice ale elementelor cilindrice 1 și 3.

Scriind ecuațiile de continuitate a deformațiilor radiale și ale rotirilor pentru elementelor 1 și 2, respectiv 2 și 3, rezultă sistemul algebric scris sub forma:

$$[A] \cdot \{S_i\} = \{T_i\}, \quad (1)$$

unde determinantul *factorilor de influență* are forma:

$$[A] = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{bmatrix}; \quad (2)$$

vectorul (transpus al) sarcinilor de legătură : $b_{ij} (i=1, \dots, 4; j=1, \dots, 4)$:

$$\{S_l\} = \{Q_{01} \ M_{01} \ Q_{02} \ M_{02}\}^T; \quad (3)$$

vectorul (transpus al) termenilor liberi $b_j (j=1, \dots, 4)$:

$$\{T_l\} = \{c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4\}^T. \quad (4)$$

Din egalitatea (1) se deduc valorile sarcinilor de legătură, sub forma:

$$\{S_l\} = [A]^{-1} \cdot \{T_l\}, \quad (5)$$

unde $[A]^{-1}$ reprezintă inversa determinantului factorilor de influență (valoarea determinantului nu este nulă).

Expresiile factorilor de influență se prezintă sub formele:

$$\begin{aligned} b_{11} &= \frac{1}{2 \cdot k_1^3 \cdot \mathfrak{R}_1} + \frac{1}{4} \cdot \delta_2^2 \cdot f_{1MR_{m1}} - c_{3w}; \quad b_{12} = -\frac{1}{2 \cdot k_1^2 \cdot \mathfrak{R}_1} - \frac{1}{2} \cdot \delta_2 \cdot f_{1MR_{m1}}; \\ b_{13} &= \frac{1}{4} \cdot \delta_2^2 \cdot f_{3MR_{m1}} - c_{5w}; \quad b_{14} = -\frac{1}{2} \cdot \delta_2 \cdot f_{3MR_{m1}}; \quad b_{21} = \frac{1}{2 \cdot k_1^2 \cdot \mathfrak{R}_1} - \frac{1}{2} \cdot \delta_2 \cdot f_{1MR_{m1}}; \\ b_{22} &= -\frac{1}{k_1 \cdot \mathfrak{R}_1} + f_{1MR_{m1}}; \quad b_{23} = \frac{1}{2} \cdot \delta_2 \cdot f_{3MR_{m1}}; \quad b_{24} = f_{3MR_{m1}}; \\ b_{31} &= -\frac{1}{4} \cdot \delta_2^2 \cdot f_{1MR_{m3}} - c_{8w}; \quad b_{32} = -\frac{1}{2} \cdot \delta_2 \cdot f_{1MR_{m3}}; \\ b_{33} &= -\frac{1}{2 \cdot k_3^3 \cdot \mathfrak{R}_3} - \frac{1}{4} \cdot \delta_2^2 \cdot f_{4MR_{m3}} - c_{10w}; \\ b_{34} &= \frac{1}{2 \cdot k_3^2 \cdot \mathfrak{R}_3} + \frac{1}{2} \cdot \delta_2 \cdot f_{4MR_{m3}}; \quad b_{41} = f_{1MR_{m3}}; \\ b_{42} &= f_{1MR_{m3}}; \quad b_{43} = \frac{1}{2 \cdot k_3^2 \cdot \mathfrak{R}_3} + \frac{1}{2} \cdot \delta_2 \cdot f_{4MR_{m3}}; \\ b_{44} &= -\frac{1}{k_3 \cdot \mathfrak{R}_3} - f_{4MR_{m3}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Studiul analitic al stărilor de solicitare într-o placă circulară plană, cu extindere restrânsă, și un racord central

Expresiile termenilor liberi (deplasări radiale: c_1, c_3 ; rotiri: c_2, c_4):

$$c_1 = \left(\frac{4 - \mu_1}{16 \cdot k_1^4 \cdot \mathfrak{R}_1} + \frac{1}{2} \cdot \delta_2 \cdot F_{1p} + \frac{1}{2} \cdot \delta_2 \cdot c_{1p_i n} - c_{1w} \right) \cdot p_i + \frac{E_1 \cdot \alpha_1 \cdot \delta_1}{4 \cdot k_1^4 \cdot \mathfrak{R}_1 \cdot R_{m1}} \cdot \Delta T_1 + C_{1T} \cdot R_{m1} + \frac{C_{2T}}{R_{m1}}; \quad (7)$$

$$c_2 = (F_{1p} + c_{1p_i n}) \cdot p_i; \quad (8)$$

$$c_3 = \left(\frac{4 - \mu_2}{16 \cdot k_1^4 \cdot \mathfrak{R}_1} - \frac{1}{2} \cdot \delta_2 \cdot F_{3p} + \frac{1}{2} \cdot \delta_2 \cdot c_{2p_i n} + c_{6w} \right) \cdot p_i + \frac{E_3 \cdot \alpha_3 \cdot \delta_3}{4 \cdot k_3^4 \cdot \mathfrak{R}_3 \cdot R_{m3}} \cdot \Delta T_3 + \frac{(1 + \mu_2) \cdot \alpha_2}{2 \cdot R_{m3}} \cdot (R_{m3}^2 - R_{m1}^2) \cdot \Delta T_2 + C_{1T} \cdot R_{m3} + \frac{C_{2T}}{R_{m3}}; \quad (9)$$

$$c_4 = (F_{3p} + c_{2p_2 n}) \cdot p_i \dots \quad (10)$$

În exprimările anterioare sunt folosite mărimi ajutătoare:

$$A_{11} = -\frac{R_{m1}^2}{2 \cdot \mathfrak{R}_2} \cdot \left(\frac{1 - \mu_2}{1 + \mu_2} - \frac{2 \cdot R_{m1}^2}{R_{m3}^2 - R_{m1}^2} \cdot \ln \frac{R_{m1}}{R_{m3}} \right); \quad (11)$$

$$A_{12} = \frac{R_{m1}^2}{4 \cdot \mathfrak{R}_2} \cdot \left(\frac{1 - \mu_2}{1 + \mu_2} - \frac{2 \cdot R_{m1}^2}{R_{m3}^2 - R_{m1}^2} \cdot \ln \frac{R_{m1}}{R_{m3}} \right); \quad (12)$$

$$A_{21} = \frac{1}{2 \cdot \mathfrak{R}_2} \cdot \frac{1 + \mu_2}{1 - \mu_2} \cdot \frac{R_{m1}^4 \cdot R_{m3}^2}{R_{m3}^2 - R_{m1}^2} \cdot \ln \frac{R_{m1}}{R_{m3}}; \quad (13)$$

$$A_{22} = -\frac{1}{4 \cdot \mathfrak{R}_2} \cdot \frac{1 + \mu_2}{1 - \mu_2} \cdot \frac{R_{m1}^4 \cdot R_{m3}^2}{R_{m3}^2 - R_{m1}^2} \cdot \ln \frac{R_{m1}}{R_{m3}}; \quad (14)$$

$$F_{1p} = B_1(R_{m1}) - \frac{1}{2} \cdot R_{m1} \cdot A_{11} - \frac{1}{R_{m1}} \cdot A_{21}; \quad B_1(R_{m1}) = -\frac{R_{m1}^3}{4 \cdot \mathfrak{R}_2} \cdot \left(\ln \frac{R_{m1}}{R_{m4}} - \frac{1}{2} \right); \quad (15)$$

$$F_{3p} = B_1(R_{m3}) - \frac{1}{2} \cdot R_{m3} \cdot A_{11} - \frac{1}{R_{m3}} \cdot A_{21}; \quad B_1(R_{m3}) = -\frac{R_{m1}^3}{4 \cdot \mathfrak{R}_2 \cdot R_{m3}} \cdot (2 \cdot R_{m3}^2 - R_{m1}^2); \quad (16)$$

$$c_{1p_2n} = \frac{R_{m4}^4}{16 \cdot \Re_2 \cdot R_{m1}} \cdot \left[\frac{3}{\beta_2^4} - \frac{3 + \mu_2}{1 + \mu_2} \cdot \frac{\beta_2^2 + 1}{\beta_2^4} - \frac{3 + \mu_2}{(1 - \mu_2) \cdot \beta_2^2} + 2 \cdot \frac{1 - \mu_2}{(1 + \mu_2) \cdot \beta_2^4} - \frac{8 \cdot \mu_2 \cdot \ln \beta_2}{\beta_2^2 \cdot (\beta_2^2 - 1) \cdot (1 - \mu_2)} \right]; \quad (17)$$

$$c_{2p_2n} = \frac{R_{m3}^2}{16 \cdot \Re_2 \cdot R_{m1}} \cdot \left[\frac{\beta_2^2 + 2 \cdot (1 - 2 \cdot \ln \beta_2)}{\beta_2^3} - \frac{3 + \mu_2}{1 + \mu_2} \cdot \frac{\beta_2^2 + 1}{\beta_2^3} - \frac{3 + \mu_2}{(1 - \mu_2) \cdot \beta_2^3} + 2 \cdot \frac{1 - \mu_2}{(1 + \mu_2) \cdot \beta_2^3} + \frac{4 \cdot \ln \beta_2}{(\beta_2^2 - 1) \cdot \beta_2^2} \cdot \left(\beta_2 - \frac{1 + \mu_2}{1 - \mu_2} \cdot \frac{1}{\beta_2} \right) \right]; \quad (18)$$

$$c_{1w} = -\frac{R_{m1}}{E_2 \cdot (R_{m3}^2 - R_{m1}^2)} \cdot \left[(1 - \mu_2) \cdot R_{m1}^2 + (1 + \mu_2) \cdot R_{m3}^2 \right]; \quad (19)$$

$$c_{3w} = -\frac{R_{m1}}{E_2 \cdot (R_{m3}^2 - R_{m1}^2)} \cdot \left[(1 - \mu_2) \cdot R_{m1}^2 + (1 + \mu_2) \cdot R_{m3}^2 \right]; \quad (20)$$

$$c_{5w} = -\frac{2 \cdot \mu_2 \cdot R_{m1} \cdot R_{m3}^2}{E_2 \cdot (R_{m3}^2 - R_{m1}^2) \cdot \delta_3}; \quad c_{6w} = -\frac{2 \cdot R_{m1}^2 \cdot R_{m3}}{E_2 \cdot (R_{m3}^2 - R_{m1}^2)}; \quad (21)$$

$$c_{8w} = -\frac{2 \cdot R_{m1}^2 \cdot R_{m3}}{E_2 \cdot (R_{m3}^2 - R_{m1}^2) \cdot \delta_2}; \quad (22)$$

$$c_{10w} = -\frac{R_{m3}}{E_2 \cdot (R_{m3}^2 - R_{m1}^2) \cdot \delta_2} \cdot \left[(1 - \mu_2) \cdot R_{m3}^2 + (1 + \mu_2) \cdot R_{m1}^2 \right]; \quad (23)$$

$$f_{1MR_{m1}} = \frac{R_{m4}^2}{(\beta_2^2 - 1) \cdot \Re_2 \cdot R_{m1}} \cdot \left[\frac{1}{(1 + \mu_2) \cdot \beta_2^2} + \frac{1}{1 - \mu_2} \right]; \quad (24)$$

$$f_{3MR_{m1}} = \frac{2 \cdot R_{m1} \cdot R_{m3}^2}{(1 - \mu_2^2) \cdot \Re_2 \cdot (R_{m3}^2 - R_{m1}^2)}; \quad f_{1MR_{m3}} = \frac{2 \cdot R_{m3}^2}{(1 - \mu_2^2) \cdot (\beta_2^2 - 1) \cdot \beta_2 \cdot \Re_2 \cdot R_{m1}}; \quad (25)$$

$$f_{4MR_{m3}} = \frac{R_{m3}^3}{(1 + \mu_2) \cdot \Re_2 \cdot (R_{m3}^2 - R_{m1}^2)} \cdot \left(1 + \frac{1 + \mu_2}{1 - \mu_2} \cdot \frac{R_{m1}^2}{R_{m3}^2} \right); \quad (26)$$

Studiul analitic al stărilor de solicitare într-o placă circulară plană, cu extindere restrânsă, și un racord central

$$C_{1T}^{\bullet} = \frac{1}{R_{m3}^2 - R_{m1}^2} \cdot (-R_{m1}^2 \cdot B_{1T} + R_{m3}^2 \cdot B_{2T}); \quad C_{2T}^{\bullet} = \frac{R_{m1}^2 \cdot R_{m3}^2}{R_{m3}^2 - R_{m1}^2} \cdot (B_{1T} - B_{2T}); \quad (27)$$

$$B_{1T} = \frac{1}{4 \cdot k_1 \cdot \mathfrak{R}_1} \cdot \frac{E_1 \cdot \alpha_1 \cdot \delta_1}{R_{m1}^2} \cdot \Delta T_1; \quad (28)$$

$$B_{2T} = \frac{1}{2 \cdot R_{m3}^2} \cdot \left[(1 + \mu_2) \cdot (R_{m3}^2 - R_{m1}^2) \cdot \alpha_2 \cdot \Delta T_2 \right] + \frac{E_3 \cdot \alpha_3 \cdot \delta_3}{2 \cdot k_3 \cdot \mathfrak{R}_3} \cdot \Delta T_3; \quad (29)$$

$$k_j = \sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu_j^2)} / \sqrt{R_{mj} \cdot \delta_j}; \quad \mathfrak{R}_j = \frac{E_j \cdot \delta_j^3}{12 \cdot (1 - \mu_j^2)}; \quad j = 1, 3. \quad (30)$$

STĂRI DE TENSIUNI

Tensiuni radiale și inelare

Notații:

$(\sigma_1)_{jx}, (\sigma_2)_{jx}$ – tensiuni radiale și inelare pentru elementul cilindric $j=1,3$;
 $[(\sigma_1)_{1x}]_{p_i, \Delta T_1}, [(\sigma_2)_{1x}]_{p_i, \Delta T_1}$ – tensiunile radiale și inelare dezvoltate de presiunea p_i și gradientul termic ΔT_1 , specifice elementului cilindric 1; $(c_{i\sigma r})_{jx}, (c_{i\sigma i})_{jx}$ – factori de influență pentru tensiunile radiale și cele radiale dezvoltate în elementele cilindrice 1 și 3 ($j=1,3$); M_{1x}, Q_{1x}, T_{1x} – momentul încovoietor radial, unitar, forța tăietoare unitară și forța inelară unitară, dependente de distanța curentă x_1 , de-a lungul elementului cilindric 1, sub acțiunea sarcinilor de legătură M_{01} și Q_{01} (fig. 4. 5); M_{3x}, Q_{3x}, T_{3x} – momentul încovoietor radial, unitar, forța tăietoare unitară și forța inelară unitară, dependente de distanța curentă x_3 , de-a lungul elementului cilindric 3, sub acțiunea sarcinilor de legătură M_{02} și Q_{02} (fig. 1 și 2).

Notă: În urma rezolvării egalității (5), se analizează *semnele sarcinilor de legătură*. În cazul în care semnul este negativ se procedează la o nouă reprezentare în figura 1, astfel ca, în continuare, să se poată stabili corect care sunt suprafețele cele mai solicitate din punct de vedere mecanic. De dorit este ca solicitările maxime să existe pe suprafețele care nu vin în contact direct cu agenții de lucru.

În continuare se trece la evaluarea *tensiunilor radiale și inelare*, în lungul tronsoanelor tubului pentru evacuarea prafului separat, pentru o stare plană de solicitare statică.

Acțiunea sarcinilor exterioare - constante

Tensiunile radiale σ_1 și inelare σ_2 , constante pe lungimea elementelor cilindrice 1 și 3 (fig. 1), au formele:

- **Pentru elementul cilindric 1** (fig. 1):

$$\left[(\sigma_1)_{1x} \right]_{p_i, \Delta T_1} = \left[(\sigma_1)_{1x} \right]_{p_i} + \left[(\sigma_1)_{1x} \right]_{\Delta T_1} = p_i \cdot R_{m1} / (2 \cdot \delta_1) + E_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T_1; \quad (31)_1$$

$$\left[(\sigma_2)_{1x} \right]_{p_i, \Delta T_1} = \left[(\sigma_2)_{1x} \right]_{p_i} + \left[(\sigma_2)_{1x} \right]_{\Delta T_1} = p_i \cdot R_{m1} / \delta_1 + E_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T_1; \quad (31)_2$$

$$\left[(\sigma_2)_{1x} \right]_{p_i} = 2 \cdot \left[(\sigma_1)_{1x} \right]_{p_i}; \quad \left[(\sigma_1)_{1x} \right]_{\Delta T_1} = \left[(\sigma_2)_{1x} \right]_{\Delta T_1} = E_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T_1. \quad (31)_3$$

- **Pentru elementul cilindric 3** (fig. 1):

$$\left[(\sigma_1)_{3x} \right]_{p_i, \Delta T_3} = \left[(\sigma_1)_{3x} \right]_{p_i} + \left[(\sigma_1)_{3x} \right]_{\Delta T_3} = p_i \cdot R_{m3} / (2 \cdot \delta_3) + E_3 \cdot \alpha_3 \cdot \Delta T_3; \quad (32)_1$$

$$\left[(\sigma_2)_{3x} \right]_{p_i, \Delta T_3} = \left[(\sigma_2)_{3x} \right]_{p_i} + \left[(\sigma_2)_{3x} \right]_{\Delta T_3} = p_i \cdot R_{m3} / \delta_3 + E_3 \cdot \alpha_3 \cdot \Delta T_3; \quad (32)_2$$

$$\left[(\sigma_2)_{3x} \right]_{p_i} = 2 \cdot \left[(\sigma_1)_{3x} \right]_{p_i}; \quad \left[(\sigma_1)_{3x} \right]_{\Delta T_3} = \left[(\sigma_2)_{3x} \right]_{\Delta T_3} = E_3 \cdot \alpha_3 \cdot \Delta T_3. \quad (32)_3$$

Acțiunea sarcinilor de legătură

În acest caz variația sarcinilor de legătură, calculate în planurile de separare a elementelor constructive (elemente cilindrice și placa plană), au formele:

- **Pentru elementul cilindric 1** (fig.1):

$$M_{1x} = M_{01} \cdot (f_4)_{1x} - (1/k_1) \cdot Q_{01} \cdot (f_2)_{1x}; \quad (33)_1$$

$$Q_{1x} = 2 \cdot k_1 \cdot M_{01} \cdot (f_2)_{1x} - Q_{01} \cdot (f_3)_{1x}; \quad (33)_2$$

$$T_{1x} = 2 \cdot k_1 \cdot R_{m1} \cdot \left[k_1 \cdot M_{01} \cdot (f_3)_{1x} - Q_{01} \cdot (f_1)_{1x} \right], \quad (33)_3$$

unde:

$$(f_1)_{1x} = e^{-k_1 \cdot x_1} \cdot \cos(k_1 \cdot x_1); \quad (f_2)_{1x} = e^{-k_1 \cdot x_1} \cdot \sin(k_1 \cdot x_1); \quad (33)_4$$

$$(f_3)_{1x} = e^{-k_1 \cdot x_1} \cdot \left[\cos(k_1 \cdot x_1) - \sin(k_1 \cdot x_1) \right] = (f_1)_{1x} - (f_2)_{1x}; \quad (33)_5$$

$$(f_4)_{1x} = e^{-k_1 \cdot x_1} \cdot \left[\cos(k_1 \cdot x_1) + \sin(k_1 \cdot x_1) \right] = (f_1)_{1x} + (f_2)_{1x}. \quad (34)_6$$

Studiul analitic al stărilor de solicitare într-o placă circulară plană, cu extindere restrânsă, și un racord central

- **Pentru elementul cilindric 3** (fig. 1):

$$M_{3x} = M_{02} \cdot (f_1)_{3x} - (1/k_3) \cdot Q_{02} \cdot (f_2)_{3x}; \quad (35)_1$$

$$Q_{3x} = 2 \cdot k_3 \cdot M_{02} \cdot (f_2)_{3x} - Q_{02} \cdot (f_3)_{3x}; \quad (35)_2$$

$$T_{3x} = 2 \cdot k_3 \cdot R_{m3} \cdot [k_3 \cdot M_{02} \cdot (f_3)_{3x} - Q_{02} \cdot (f_1)_{3x}], \quad (35)_3$$

unde:

$$(f_1)_{3x} = e^{-k_3 \cdot x_3} \cdot \cos(k_3 \cdot x_3); \quad (f_2)_{3x} = e^{-k_3 \cdot x_3} \cdot \sin(k_3 \cdot x_3); \quad (35)_4$$

$$(f_3)_{3x} = e^{-k_3 \cdot x_3} \cdot [\cos(k_3 \cdot x_3) - \sin(k_3 \cdot x_3)] = (f_1)_{3x} - (f_2)_{3x}; \quad (35)_5$$

$$(f_4)_{3x} = e^{-k_3 \cdot x_3} \cdot [\cos(k_3 \cdot x_3) + \sin(k_3 \cdot x_3)] = (f_1)_{3x} + (f_2)_{3x}, \quad (35)_6$$

cotele curente x_1 și x_3 fiind măsurate în lungul elementelor cilindrice 1 și 3, începând din planurile de separare cu placa 2 (fig. 1).

Expresiile tensiunilor radiale și inelare dezvoltate de sarcinile de legătură în lungul elementelor cilindrice au formele:

- **Pentru elementul cilindric 1** (fig. 1):

$$\{(\sigma_1)_{1x}; (\sigma_2)_{1x}\} = \left\{ \left[(\sigma_1)_{1x} \right]_{p_i, \Delta T_1} \cdot (c_{i\sigma r})_{1x}; \left[(\sigma_2)_{1x} \right]_{p_i, \Delta T_1} \cdot (c_{i\sigma i})_{1x} \right\}; \quad (36)_1$$

$$(c_{i\sigma r})_{1x} = 1 + \left\{ \left(\pm 6 \cdot M_{1x} / \delta_1^2 \right) / \left[p_i \cdot R_{m1} / (2 \cdot \delta_1) + E_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T_1 \right] \right\}; \quad (36)_2$$

$$(c_{i\sigma i})_{1x} = 1 + \left\{ \left[\pm 6 \cdot \mu_1 \cdot M_{1x} / \delta_1^2 + T_{1x} / \delta_1 \right] / \left[p_i \cdot R_{m1} / \delta_1 + E_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T_1 \right] \right\}. \quad (36)_3$$

- **Pentru elementul cilindric 3** (fig. 1):

$$\{(\sigma_1)_{3x}, (\sigma_2)_{3x}\} = \left\{ \left[(\sigma_1)_{3x} \right]_{p_i, \Delta T_3} \cdot (c_{i\sigma r})_{3x}, \left[(\sigma_2)_{3x} \right]_{p_i, \Delta T_3} \cdot (c_{i\sigma i})_{3x} \right\}; \quad (37)_1$$

$$(c_{i\sigma r})_{3x} = 1 + \left\{ \left[\pm 6 \cdot M_{3x} / \delta_3^2 \right] / \left[p_i \cdot R_{m3} / (2 \cdot \delta_3) + E_3 \cdot \alpha_3 \cdot \Delta T_3 \right] \right\}; \quad (37)_2$$

$$(c_{i\sigma i})_{3x} = 1 + \left\{ \left[\pm 6 \cdot \mu_3 \cdot M_{3x} / \delta_3^2 + T_{3x} / \delta_3 \right] / \left[p_i \cdot R_{m3} / \delta_3 + E_3 \cdot \alpha_3 \cdot \Delta T_3 \right] \right\}. \quad (37)_3$$

Notă: Semnul plus din egalitățile (36)_{2,3} și (37)_{2,3} se ia în considerație pentru suprafețele

interioare ale componentelor cilindrice $j = 1, 3$ (fig. 1), conform schemei acceptate pentru studiu.

În sensul celor de mai sus trebuie analizate variațiile funcțiilor M_{1x} , T_{1x} , respectiv M_{3x} , T_{3x} . Se poziționează secțiunile în care aceste mărimi sunt maxime, reflectând solicitarea de încovoiere (M_{1x}, M_{3x}), respectiv solicitarea de întindere/comprimare în direcție inelară (T_{1x}, T_{3x}). Se deduc cotele (x_{1M} - pentru momentul unitar radial, unitar M_{1x} și x_{1T} - pentru forța unitară inelară T_{1x}); (x_{3M} - pentru momentul încovoietor unitar radial M_{3x} și x_{3T} - pentru forța unitară inelară T_{3x}):

$$\{x_{1M}, x_{1T}\} = \frac{1}{k_1} \cdot \left\{ \arctg \left(\frac{Q_{01}}{Q_{01} - 2 \cdot k_1 \cdot M_{01}} \right); \arctg \left(\frac{2 \cdot k_1 \cdot M_{01} - Q_{01}}{Q_{01}} \right) \right\}, \quad (38)$$

$$\{x_{3M}, x_{3T}\} = \frac{1}{k_3} \cdot \left\{ \arctg \left(\frac{Q_{02}}{Q_{02} - 2 \cdot k_3 \cdot M_{02}} \right); \arctg \left(\frac{2 \cdot k_3 \cdot M_{02} - Q_{02}}{Q_{02}} \right) \right\}. \quad (39)$$

Tensiuni echivalente dezvoltate de sarcinile exterioare – constante

În contextul ipotezei că presiunile și gradientii termici – sarcini exterioare - sunt valori constante în lungul elementelor cilindrice 1 și 3, tensiunile echivalente, în acest caz, nu sunt dependente de cota x (se are în vedere teoria energiei de variație a formei - (varianta **Huber – Hencky – Mises**):

- **Pentru elementul cilindric 1** (fig. 1):

$$\left[(\sigma_{ech})_{1x} \right]_{p_i, \Delta T_1} = \sqrt{\left[(\sigma_1)_{1x} \right]_{p_i, \Delta T_1}^2 + \left[(\sigma_2)_{1x} \right]_{p_i, \Delta T_1}^2 - \left[(\sigma_1)_{1x} \right]_{p_i, \Delta T_1} \cdot \left[(\sigma_2)_{1x} \right]_{p_i, \Delta T_1}}; \quad (40)_1$$

$$\left[(\sigma_{ech})_{1x} \right]_{p_i, \Delta T_1} = \sqrt{3 \cdot \left[p_i \cdot R_{m1} / (2 \cdot \delta_1) \right]^2 + 3 \cdot \left[p_i \cdot R_{m1} / (2 \cdot \delta_1) \right] \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T_1) + (E_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T_1)^2}, \quad (40)_2$$

sau, pentru efecte individuale:

$$\left[(\sigma_{ech})_{1x} \right]_{p_i} = \sqrt{3} \cdot p_i \cdot R_{m1} / (2 \cdot \delta_1); \left[(\sigma_{ech})_{1x} \right]_{\Delta T_1} = E_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T_1. \quad (40)_3$$

- **Pentru elementul cilindric 3** (fig. 1):

$$\left[(\sigma_{ech})_{3x} \right]_{p_i, \Delta T_3} = \sqrt{\left[(\sigma_1)_{3x} \right]_{p_i, \Delta T_3}^2 + \left[(\sigma_2)_{3x} \right]_{p_i, \Delta T_3}^2 - \left[(\sigma_1)_{3x} \right]_{p_i, \Delta T_3} \cdot \left[(\sigma_2)_{3x} \right]_{p_i, \Delta T_3}}; \quad (40)_4$$

Studiul analitic al stărilor de solicitare într-o placă circulară plană, cu extindere restrânsă, și un racord central

$$\left[(\sigma_{ech})_{3x} \right]_{p_i, \Delta T_3} = \sqrt{3 \cdot \left[p_i \cdot R_{m3} / (2 \cdot \delta_3) \right]^2 + 3 \cdot \left[p_i \cdot R_{m3} / (2 \cdot \delta_3) \right] \cdot (E_3 \cdot \alpha_3 \cdot \Delta T_3) + (E_3 \cdot \alpha_3 \cdot \Delta T_3)^2}, \quad (40)_5$$

sau, pentru efecte individuale:

$$\left[(\sigma_{ech})_{3x} \right]_{p_i} = \sqrt{3} \cdot p_i \cdot R_{m3} / (2 \cdot \delta_3); \left[(\sigma_{ech})_{3x} \right]_{\Delta T_3} = E_3 \cdot \alpha_3 \cdot \Delta T_3. \quad (40)_6$$

Tensiuni echivalente dezvoltate de sarcinile de legătură

În cazul de față se are în vedere faptul că sarcinile de legătură sunt dependente de lungimea variabilă în lungul elementului cilindric considerat.

Se adoptă relațiile adecvate:

- **Pentru elementul cilindric 1** (fig. 1):

$$\left(\sigma_{1M} \right)_{1x} = 6 \cdot M_{1x} / \delta_1^2; \left(\sigma_{2M} \right)_{1x} = \mu_1 \cdot \left(\sigma_{1M} \right)_{1x}; \left(\sigma_{1T} \right)_{1x} = 0; \left(\sigma_{2T} \right)_{1x} = T_{1x} / \delta_1; \quad (41)$$

tensiunile echivalente existente la interiorul sau la exteriorul cilindrului 1 pot fi evaluate cu relații de forma:

$$\left[(\sigma_{ech})_{1x} \right]_{M_{1x}, T_{1x}} = \sqrt{\left(\sigma_{1M} \right)_{1x}^2 + \left[\left(\sigma_{2M} \right)_{1x} + \left(\sigma_{2T} \right)_{1x} \right]^2 - \left(\sigma_{1M} \right)_{1x} \cdot \left[\left(\sigma_{2M} \right)_{1x} + \left(\sigma_{2T} \right)_{1x} \right]}, \quad (42)$$

respectiv:

$$\left[(\sigma_{ech})_{1x} \right]_{M_{1x}, T_{1x}} = \sqrt{(1 - \mu_1 + \mu_1^2) \cdot \left(\sigma_{1M} \right)_{1x}^2 + (2 \cdot \mu_1 - 1) \cdot \left(\sigma_{1M} \right)_{1x} \cdot \left(\sigma_{2T} \right)_{1x}}. \quad (43)$$

În cazul neglijării efectului forței unitare de întindere/comprimare T_{1x} se ajunge la:

$$\left[(\sigma_{ech})_{1x} \right]_{M_{1x}} = \left(\sigma_{1M} \right)_{1x} \cdot \sqrt{(1 - \mu_1 + \mu_1^2)}; \left[(\sigma_{ech})_{1x} \right]_{T_{1x}} = T_{1x} / \delta_1. \quad (44)$$

- **Pentru elementul cilindric 3** (fig. 1):

$$\left(\sigma_{1M} \right)_{3x} = 6 \cdot M_{3x} / \delta_3^2; \left(\sigma_{2M} \right)_{3x} = \mu_3 \cdot \left(\sigma_{1M} \right)_{3x}; \left(\sigma_{1T} \right)_{3x} = 0; \left(\sigma_{2T} \right)_{3x} = T_{3x} / \delta_3; \quad (45)$$

tensiunile echivalente existente la interiorul sau la exteriorul cilindrului 1 pot fi evaluate cu relații

de forma:

$$\left[(\sigma_{ech})_{3x} \right]_{M_{3x}, T_{3x}} = \sqrt{\frac{(\sigma_{1M})_{3x}^2 + \left[(\sigma_{2M})_{3x} + (\sigma_{2T})_{3x} \right]^2}{- (\sigma_{1M})_{3x} \cdot \left[(\sigma_{2M})_{3x} + (\sigma_{2T})_{3x} \right]}}, \quad (46)$$

respectiv:

$$\left[(\sigma_{ech})_{3x} \right]_{M_{3x}, T_{3x}} = \sqrt{(1 - \mu_3 + \mu_3^2) \cdot (\sigma_{1M})_{3x}^2 + (2 \cdot \mu_3 - 1) \cdot (\sigma_{1M})_{3x} \cdot (\sigma_{2T})_{3x}}. \quad (47)$$

În cazul neglijării efectului forței unitare de întindere/comprimare T_{3x} se ajunge la:

$$\left[(\sigma_{ech})_{3x} \right]_{M_{3x}} = (\sigma_{1M})_{3x}^2 \cdot \sqrt{(1 - \mu_3 + \mu_3^2)}; \quad \left[(\sigma_{ech})_{1x} \right]_{T_{3x}} = T_{3x} / \delta_3. \quad (48)$$

Observație: Tensiunile echivalente dezvoltate de sarcinile de legătură trebuie să se calculeze în planurile în care acestea sunt extreme (expresiile (38) și (39)).

Tensiuni echivalente (cu efectul forțelor unitare de forfecare)

Tensiunile de forfecare dezvoltate de forțele unitare de forfecare și de momentele încovoietoare radiale unitare, pentru elementele cilindrice 1 și 3, se pot evalua cu relația:

$$\{ \tau_{1x}, \tau_{3x} \} = \{ Q_{1x} / \delta_1, Q_{3x} / \delta_3 \}, \quad (49)$$

în care Q_{1x} , Q_{3x} și au formele (33)₂, (35)₂.

Atunci când se are în vedere și efectul forfecării, expresia tensiunii echivalente se modifică conform expresiei:

$$\left\{ (\sigma_{ech})_{1x}; (\sigma_{ech})_{3x} \right\} = \left\{ \sqrt{(\sigma_{ech})_{1x}^2 + 3 \cdot \tau_{1x}^2}; \sqrt{(\sigma_{ech})_{3x}^2 + 3 \cdot \tau_{3x}^2} \right\}. \quad (50)_1$$

respectiv:

$$\left[(\sigma_{ech})_{3x} \right]_{Q_{3x}} = \sqrt{3} \cdot \tau_{3x} \cdot \left[(\sigma_{ech})_{1x} \right]_{Q_{1x}} = \sqrt{3} \cdot \tau_{1x}; \quad (50)_2$$

De această dată intervine și influența forței unitare de forfecare Q_{1x} - relația (33)₂ -, respectiv Q_{3x} - egalitatea (35)₂, în aprecierea posibilă a valorilor maxime ale tensiunilor echivalente. Secțiunile estimate în lungul cilindrilor 1 și 3 (fig. 1) se pot calcula cu ajutorul expresiilor:

$$\left\{ x_{1Q} \right\} = \left\{ (1/k_1) \cdot \arctg \left[\frac{(k_1 \cdot M_{01} + Q_{01})}{(k_1 \cdot M_{01})} \right] \right\}. \quad (51)$$

Studiul analitic al stărilor de solicitare într-o placă circulară plană, cu extindere restrânsă, și un racord central

Se pot utiliza egalitățile:

$$\left\{ \left(\sigma_{ech} \right)_{1x} \right\}_{max} = \left[\left(\sigma_{ech} \right)_{1x} \right]_{p_i, \Delta T_1} + \left[\left(\sigma_{ech} \right)_{1x} \right]_{M_{1x}, T_{1x}} + \left[\left(\sigma_{ech} \right)_{1x} \right]_{Q_{1x}}, \quad (52)$$

pentru cilindrul 1, respectiv:

$$\left\{ \left(\sigma_{ech} \right)_{3x} \right\}_{max} = \left[\left(\sigma_{ech} \right)_{3x} \right]_{p_1, \Delta T_3} + \left[\left(\sigma_{ech} \right)_{3x} \right]_{M_{3x}, T_{3x}} + \left[\left(\sigma_{ech} \right)_{3x} \right]_{Q_{3x}}, \quad (53)$$

pentru cilindrul 3.

Tensiunile echivalente totale pot fi evaluate și prin intermediul tensiunilor echivalente parțiale ale presiunii, efectului termic, al momentelor încovoietoare radiale unitare, al forțelor unitare de întindere/comprimare, respectiv al tensiunilor de forfecare, scrise sub formele:

$$\begin{aligned} \left[\left(\sigma_{ech}^{\bullet\bullet} \right)_{1x} \right]_{max} = & c_p \cdot \left[\left(\sigma_{ech} \right)_{1x} \right]_{p_i} + c_{\Delta T} \cdot \left[\left(\sigma_{ech} \right)_{1x} \right]_{\Delta T_1} + \\ & + c_M \cdot \left[\left(\sigma_{ech} \right)_{1x} \right]_{M_{1x}} + c_T \cdot \left[\left(\sigma_{ech} \right)_{1x} \right]_{T_{1x}} + c_Q \cdot \sqrt{3} \cdot \tau_{1x}, \end{aligned} \quad (54)$$

pentru cilindrul 1, respectiv:

$$\begin{aligned} \left[\left(\sigma_{ech}^{\bullet\bullet} \right)_{3x} \right]_{max} = & c_p \cdot \left[\left(\sigma_{ech} \right)_{3x} \right]_{p_i} + c_{\Delta T} \cdot \left[\left(\sigma_{ech} \right)_{1x} \right]_{\Delta T_3} + \\ & + c_M \cdot \left[\left(\sigma_{ech} \right)_{3x} \right]_{M_{3x}} + c_T \cdot \left[\left(\sigma_{ech} \right)_{3x} \right]_{T_{3x}} + c_Q \cdot \sqrt{3} \cdot \tau_{3x}, \end{aligned} \quad (55)$$

pentru cilindrul 3.

În relațiile anterioare $c_p, c_{\Delta T}, c_M, c_T, c_Q$ sunt factori de selectare a efectului sarcinilor precizate: presiune, gradient termic, moment încovoietor radial unitar, forță unitară inelară de întindere/comprimare, forță tăietoare unitară. Când coeficienții au valori egale cu unitatea, efectul sarcinii este prezent, în timp ce atunci când coeficienții au valori nule, acestea se îndepărtează.

Notă: Este necesară evaluarea valorilor maxime ale tensiunilor echivalente pe suprafețele elementelor cilindrice 1 și 3, pentru a fi comparate cu rezistența admisibilă caracteristică materialelor de construcție, în condițiile de funcționare. Astfel, $\left\{ \left(\sigma_{ech} \right)_{1x} \right\}_{max} \leq \sigma_{1a} = c_s \cdot \sigma_c$ sau $\left\{ \left(\sigma_{ech} \right)_{3x} \right\}_{max} \leq \sigma_{3a} = c_s \cdot \sigma_c$, σ_c reprezentând limita convențională de curgere a materialului metalic.



Apelând la **criteriul participării sau al contribuției sarcinilor** privind capacitatea portantă a structurii analizate se poate scrie:

$$\left[f_{pp} \right]_j + \left[f_{p\Delta T} \right]_j + \left[f_{pM_x} \right]_j + \left[f_{pT_x} \right]_j + \left[f_{p\tau_x} \right]_j \leq 1, \quad (56)$$

unde au fost utilizate notațiile: f_{pp} – factorul de participare/contribuție corespunzător presiunii

de lucru; $f_{p\Delta T}$ - factorul de participare/contribuție a efectului termic; f_{pM_x} - factorul de participare/contribuție a momentului încovoietor radial unitar, cu valoare maximă, la o cotă curentă x , situată în lungului învelișului cilindric; f_{pT_x} - factorul de participare/contribuție a forței unitare înelare de întindere/comprimare, la o cotă curentă x , situată în lungul învelișului cilindri analiza; $f_{p\tau_x}$ - factorul de participare/contribuție a forței unitare tăietoare, la o cotă curentă x , măsurată în lungul învelișului cilindric; j – reprezintă numărul învelișului cilindric considerat.

Exprimările **factorilor de participare/contribuție** se prezintă sub formele:

$$\begin{aligned} [f_{pp}]_j &= [(\sigma_{ech})_{jx}]_p / \sigma_a; & [f_{p\Delta T}]_j &= [(\sigma_{ech})_{jx}]_{\Delta T_j} / \sigma_a; \\ [f_{pM_x}]_j &= [(\sigma_{ech})_{jx}]_{M_{jx}} / \sigma_a; & [f_{pT_x}]_j &= [(\sigma_{ech})_{jx}]_{T_{jx}} / \sigma_a; \\ [f_{p\tau_x}]_j &= [(\sigma_{ech})_{jx}]_{Q_{jx}} / \sigma_a. \end{aligned} \quad (57)$$

CONCLUZII

În cele ce preced se are în vedere analiza stărilor de tensiuni dezvoltate într-o structură formată dintr-o placă plană cu orificiu central și un tub de legătură, respectiv un cilindru care se sudează la partea marginală a plăcii. Se consideră o placă cu dimensiune relativ redusă, astfel încât se resimt reciproc efectele sarcinilor marginale. Elementele cilindrice se apreciază ca fiind lungi. Materialele din care se realizează componentele structurii pot la fel sau diferite. Expresiile matematice deduse atât pentru sarcinile de legătură, cât și pentru sarcinile de lucru, constante valoric.

O mențiune interesantă este aceea de a introduce în studiu caracteristicile mecanice ale materialului de construcție la momentul analizei, cunoscut fiind faptul că valorile respective se modifică pe parcursul utilizării ciclonului. Numai în acest mod se face o evaluare corectă a prescrierii prelungirii perioadei de serviciu a structurii mecanice, sau nu ($\sigma_{cd} = c_d \cdot \sigma_c$; σ_{cd} – limita de curgere a materialului testat după perioada de utilizare; c_d - factorul de degradare a caracteristicilor materialului metalic).

Studiul analitic al stărilor de solicitare într-o placă circulară plană, cu extindere restrânsă,
și un racord central

BIBLIOGRAFIE

- [1] Iatan I. R., Roman (Urse) G., Tomescu Gh., Chelu A., Analytical study of thermomechanical strength of assemblies with optional plane flanges. The effect of the flange ring rotation around the median circumference, *Revista de Chimie*, 71, nr. 3, 2020, p. 79 – 89.
- [2] Iatan I. R., Prodea I.M, Stări de solicitare în zonele de evacuare a mediilor de lucru din recipientele cu mantale de încălzire/răcire (I) (Stress conditions in the evacuation areas of working media from containers with heating/cooling jackets (I)), *Tehnologia inovativă – Revista “Construcția de mașini”*, nr. 1, 2007, p. 85 – 92.
- [3] Constantinescu, I., Tacu, T., *Calcul de rezistență pentru utilaje tehnologice (Resistance calculations for technological machines)*, Editura Tehnică, București, 1979.
- [4] Iatan I. R., Sima T., Sporea N., Modele privind calculul reazemelor laterale ale recipientelor sub presiune (Modele privind calculul reazemelor laterale ale recipientelor sub presiune), *Revista de chimie*, 52, nr. 10, 2001, p. 593 – 599.
- [5] Iatan I. R., ș. a., Calculul și construcția tamburelor centrifugelor. I. Tambure cilindrice nerigidizate, cu funduri și capace plane, pentru sedimentare (Calculation and construction of centrifuge drums. I. Non-rigid cylindrical drums, with flat bottoms and covers, for sedimentation), *Revista de Chimie*, 36, nr. 12, 1985, p. 1138 – 1145
- [6] Iatan I. R., ș. a., Calculul și construcția tamburelor centrifugelor. II. Stări de deformare și de tensiuni în fundurile circulare plane (Calculation and construction of centrifuge drums. II. States of deformations and stress in flat circular bottoms), *Revista de Chimie*, 41, nr. 1, 1990, p. 67 – 74.
- [7] x x x SR EN 13445 – 3, Recipiente sub presiune nesupuse la flacără, Partea 3: Proiectare (Nonflammable pressure vessels, Part 3: Design), ASRO, Iulie 2004. vol. 2/3
- [8] Moos, R. D., *Pressure Vessel. Design Manual*, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1997
- [9] Iatan I. R., Păunescu M., Tacă C. D., Asupra concentrării de tensiuni în zona îmbinării a două virole cilindrice cu abateri de formă (On the stress concentration in the joint area of two cylindrical ferrules with shape deviations), *Buletinul Institutului Politehnic din București, Seria Mecanică*, vol. 56 – 57, 1984 – 1985, p. 170 – 178.
- [10] Zichil V., Iatan I. R., Bibire L., Busuioceanu P., Șerban L., Thermomechanical loading in beveled area between two cylindrical shells with different thicknesses. Theoretical study – Connections loads, *Journal of Engineering Studies and Research*, vol. 20, nr. 1, 2014, p. 87 – 100.
- [11] Iatan I. R., Tacă C.D., Păunescu M., *Evaluarea intensității stării de solicitare în zona de îmbinare prin sudare a două virole cilindrice coaxiale de diametre diferite*, *Construcția de mașini*, 37, 1985, nr. 4, p. 222 – 226.
- [12] Iatan I. R., Nicolau L., *Evaluarea influenței racordării între virolele tronconice și cilindrice asupra stării de tensiuni*, *Buletinul Institutului Politehnic București*, vol. 50, 1988, p. 57 – 64.
- [13] Iatan I. R., Marchidan V., Vasilescu I., *Calculul stării de tensiune în zona sudurii circulare cu abateri de la rectilinitate a interiorului coloanei de sinteză a amoniacului*, *B.I.T. – I.S.C.I.R.*, nr. 4, 1991, p. 8 – 34.
- [14] Iatan I. R., *Metodă generală de calcul al unei îmbinări de tip placă plană – înveliș cilindric (II)*, *Buletinul Universității “Petrol - Gaze” Ploiești*, vol. LII, Seria Tehnică, nr. 2, 2000, p. 171 – 173.

- [15] Iatan I. R., *Stări de tensiune în zonele de racordare ale porțiunilor cilindro-conice ale echipamentelor sub presiune*, Construcția de mașini, 52, nr. 12, 2000, p. 9 – 11.
- [16] Iatan, I. R., *Studiul stărilor de solicitare în zonele de îmbinare a învelișurilor sferice cu învelișuri cilindrice.I. Se neglijează efectul cordonului de sudură din îmbinare*, Revista de chimie, 56, nr. 1, 2005, p. 19 – 23.
- [17] Iatan, I. R., *Evaluarea stărilor de tensiuni în capacele sferice cu inele marginale (I)*, Buletinul Universității Petrol-Gaze din Ploiești, vol.LVII, Seria tehnică, nr. 4, 2005, p. 207 – 212;
- [18] Iatan I. R., Jugănaru M., Ștefănescu M., *Calculul și construcția tamburelor centrifugelor II. Stări de deformații și de tensiuni în fundurile circulare plane*, Revista de chimie, 41, nr. 1, 1990, p. 67 – 74.