УДК 621.373.52

РОЗРАХУНОК КОНТАКТНОГО ТИСКУ В ВУЗЛАХ ВОЛОГОЗАХИСТУ АЛЮМІНІЄВИХ КОНДЕНСАТОРІВ

Ройзман В.П., Возняк А.Г.
Хмельницький національний університет

Стаття присвячена розрахунку контактного тиску в вузлах вологозахисту на прикладі алюмінієвих конденсаторів. Виведено формули для розрахунку контактного тиску за схемою тришарового товстостінного циліндра. Розраховано розподіл напружень в кожному елементі конструкції.
Ключові слова: компаунд, конденсатор, гермовузол, контактний тиск, напруження.

Постановка проблеми. На рис. 1 схематично зображено плівковий конденсатор К78. Корпус 3 являє з себе тонкостінну циліндричну оболонку, в якій розміщена секція конденсатора, негерметично закрита текстолітова перегородка 4, яка має отвір для контактного виводу 1.

Після того, як конденсатор був зібраний, зі сторони його вільного торця проводиться заливка герметизуючим компаундом ЕК-23. Полімеризація цього компаунда проходить при температурі 100° С. По такій же схемі організуються гермовузли ємностей найрізноманітнішої форми, розмірів, назв. В ці ємності вварюються горловини, в яких і організовуються подібні гермовузли.

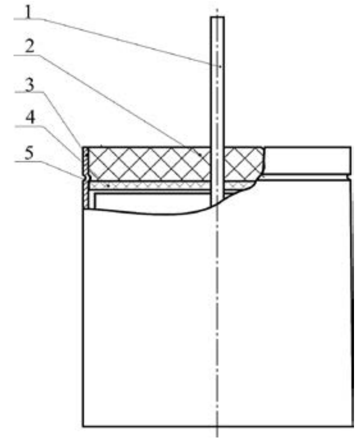

Рис. 1. Конструкція плівкового конденсатору
1 – вивід; 2 – компаунд; 3 – корпус; 4 – перегородка; 5 – штампування в корпусі, так званий «зиг»

Корпус конденсатора виготовляється з алюмінієвого сплаву. Контактний вивід виготовлений з мідного дроту. Перегородка штампується з текстоліту.

Цей конденсатор проходить випробування на термоудари від +100° С до –60° С, під час яких нерідко має місце розгерметизація через відшаровування компаунда від оболонки або розтріскування компаунда.

Безумовно, цьому дефекту сприяють суттєва різниця значень фізико-математичних характеристик матеріалів, які з'єднуються в вузлі вологозахисту, і великий розкид значень характеристик компаунда, який може досягати 300% і більше.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Відшарування і розтріскування виникають від дії контактного тиску, який виникає на границі компаунда з алюмінієвим корпусом і мідним виводом при коливанні температур від –60° С до +100° С.

Мета статті. Головною метою цієї статті є вивід формул для контактного тиску.

Виклад основного матеріалу. Для початку розрахуємо контактний тиск, який виникає по довжині контакту компаунда і оболонки (рис. 2). Будемо вважати, що внутрішній радіус компаундованого циліндра дорівнює нулю, тобто в моделі відсутній вивід.

Використаємо диференційне рівняння $\frac{d^4y}{dz^4} + \frac{E \cdot h}{R^2 \cdot D} \cdot y = \frac{f(z)}{D}$, де $y(z)$ – радіальне переміщення точок серединної поверхні оболонки, яке відраховується від недеформованного стану серединної поверхні; h – товщина оболонки; R – радіус серединної поверхні оболонки: E – модуль пружності матеріалу; $D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\mu^2)}$ – циліндрична жорсткість $\propto$ – коефіцієнт Пуассона матеріалу; $f(z)$ – розподілене навантаження.

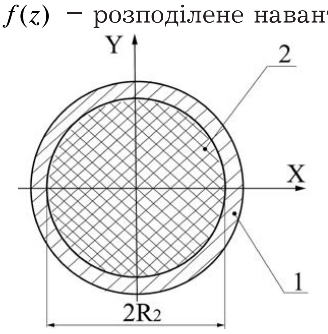

Рис. 2. Схема для розрахунку контактного тиску при відсутності контактного виводу:
1 – оболонка; 2 – компаунд

З урахуванням температурного впливу це диференціальне рівняння набуде вигляду

$$\frac{d^4y}{dz^4} + \frac{E \cdot h}{R^2 \cdot D} \cdot y = \frac{P_k}{D} + \frac{E \cdot h}{R \cdot D} \cdot \alpha \cdot \Delta T, \tag{1}$$

де P_k – контактний тиск; α – температурний коефіцієнт лінійного розширення; ΔT – перепад температури.

Введемо такі позначення:

$$q = \frac{P_k}{D} + \frac{E \cdot h}{R \cdot D} \cdot \alpha \cdot \Delta T; \quad \beta^4 = \frac{E \cdot h}{4 \cdot R^2 \cdot D}. \tag{2}$$

Тоді часткове рішення неоднорідного рівняння для рівняння (1) можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} y_1 &= e^{\beta z} \cdot \cos\beta z, \quad y_3 = e^{-\beta z} \cdot \cos\beta z, \\ y_2 &= e^{\beta z} \cdot \sin\beta z, \quad y_4 = e^{-\beta z} \cdot \sin\beta z. \end{aligned} \tag{3}$$

Загальний розв'язок рівняння (1) знаходиться методом варіації постійних C_i, в загальному розв'язку однорідного рівняння, для рівняння (1)

$$y = C_1 \cdot y_1 + C_2 \cdot y_2 + C_3 \cdot y_3 + C_4 \cdot y_4.$$

Для цього складається система рівнянь:

$$\left.\begin{aligned} C_1' \cdot y_1 + C_2' \cdot y_2 + C_3' \cdot y_3 + C_4' \cdot y_4 = 0 \\ C_1' \cdot y_1' + C_2' \cdot y_2' + C_3' \cdot y_3' + C_4' \cdot y_4' = 0 \\ C_1' \cdot y_1'' + C_2' \cdot y_2'' + C_3' \cdot y_3'' + C_4' \cdot y_4'' = 0 \\ C_1' \cdot y_1''' + C_2' \cdot y_2''' + C_3' \cdot y_3''' + C_4' \cdot y_4''' = q \end{aligned}\right\}. \quad (4)$$

Визначник цієї системи з урахуванням рівнянь (3) буде дорівнювати $\Delta = 32 \cdot \beta^6$. Далі знаходимо усі C_i із системи (4):

$$C_1' = -\frac{q \cdot e^{-\beta z}}{8 \cdot \beta^3} \cdot (\sin \beta z + \cos \beta z),$$

$$C_2' = \frac{q \cdot e^{-\beta z}}{8 \cdot \beta^3} \cdot (\cos \beta z - \sin \beta z),$$

$$C_3' = \frac{q \cdot e^{\beta z}}{8 \cdot \beta^3} \cdot (\cos \beta z - \sin \beta z),$$

$$C_1' = -\frac{q \cdot e^{\beta z}}{8 \cdot \beta^3} \cdot (\sin \beta z + \cos \beta z).$$

Проінтегрувавши рівняння (4), знайдемо значення довільних постійних

$$C_1 = -\frac{1}{8 \cdot \beta^3} \cdot \int_0^z q \cdot e^{-\beta z} \cdot (\cos \beta z + \sin \beta z) dz + \overline{C_1},$$

$$C_2 = \frac{1}{8 \cdot \beta^3} \cdot \int_0^z q \cdot e^{-\beta z} \cdot (\cos \beta z - \sin \beta z) dz + \overline{C_2},$$

$$C_3 = \frac{1}{8 \cdot \beta^3} \cdot \int_0^z q \cdot e^{\beta z} \cdot (\cos \beta z - \sin \beta z) dz + \overline{C_3},$$

$$C_4 = -\frac{1}{8 \cdot \beta^3} \cdot \int_0^z q \cdot e^{\beta z} \cdot (\cos \beta z + \sin \beta z) dz + \overline{C_4}.$$

де $\overline{C_i}$ – довільні постійні.

Таким чином, прогин серединної поверхні оболонки конденсатора буде описуватися рівнянням:

$$\begin{aligned} y(z) = &-\frac{e^{\beta z} \cos \beta z}{8 \cdot \beta^3} \cdot \left(\int_0^z q \cdot e^{-\beta z} \cdot (\cos \beta z + \sin \beta z) dz + \overline{C_1} \right) + \\ &+ \frac{e^{\beta z} \sin \beta z}{8 \cdot \beta^3} \cdot \left(\int_0^z q \cdot e^{-\beta z} \cdot (\cos \beta z - \sin \beta z) dz + \overline{C_2} \right) + \\ &+ \frac{e^{-\beta z} \cos \beta z}{8 \cdot \beta^3} \cdot \left(\int_0^z q \cdot e^{\beta z} \cdot (\cos \beta z - \sin \beta z) dz + \overline{C_3} \right) - \\ &- \frac{e^{-\beta z} \sin \beta z}{8 \cdot \beta^3} \cdot \left(\int_0^z q \cdot e^{\beta z} \cdot (\cos \beta z + \sin \beta z) dz + \overline{C_4} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Тепер виведемо формули для переміщення зовнішнього радіуса герметизуючого компаунда, від дії контактного тиску при наступних припущеннях:

1. Напруженнями, які виникають під час хімічного осаду компаунда нехтуємо.
2. Коефіцієнти лінійного розширення компаунда і оболонок різні, частіше $\alpha_{комп} > \alpha_{об}$.
3. Використовуємо закон Гука.
4. Радіальні деформації не залежать від координат по поздовжній осі, при достатньому віддаленні від торців гермовузла.
5. Втягування оболонки компаундом проходить внаслідок температурного звуження компаунда.

При цих припущеннях елементи, у яких товщина стінки більше однієї десятої серединного радіуса можуть розглядатися як товстостінний компаундний циліндр, навантажений тиском з боку виводу і оболонки.

Розглянемо загальний випадок навантаження товстостінного циліндра тисками P_1 – внутрішній і P_2 – зовнішній. Позначимо R_1 і R_2 – внутрішній і зовнішній радіуси компаундного циліндра. Якщо циліндр нерівномірно нагрівається, то в ньому з'являються температурні навантаження, які потрібно додати до навантажень, викликаних тиском.

Розглянемо рівновагу нескінченно малої частинки компаунда (рис. 3), яка утворена двома поперечними площинами з відстанню dz між ними, двома осьовими площинами, з кутом $d\varphi$ між ними, і двома циліндрами з радіусами R і $(R + dR)$.

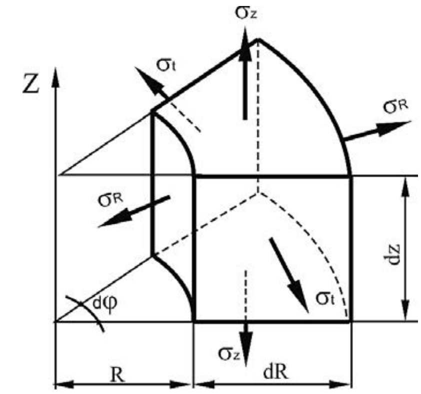

Рис. 3. Нескінченно мала частина компаунда

В теорії товстостінних циліндрів (теорії Ляме) показано, що можна отримати наступне рівняння [1]:

$$\begin{aligned} u = &\frac{1}{r} \cdot \frac{1+\mu}{1-\mu} \cdot \int_{R_1}^{r} \alpha \cdot \Delta T \cdot r dr + \\ &+ r \cdot \left[\frac{(1-2\mu) \cdot (P_1 R_1^2 - P_2 R_2^2)}{E_1 \cdot (R_2^2 - R_1^2)} + \frac{1-3\mu}{(1-\mu) \cdot (R_2^2 - R_1^2)} \int_{R_1}^{R_2} \alpha \cdot \Delta T \cdot r dr \right] \\ &+ \frac{1}{r} \cdot \left[\frac{(1+\mu) \cdot (P_1 - P_2) \cdot R_1^2 \cdot R_2^2}{E \cdot (R_2^2 - R_1^2)} + \frac{R_1^2 \cdot (1+\mu)}{(1-\mu) \cdot (R_2^2 - R_1^2)} \cdot \int_{R_1}^{R_2} \alpha \cdot \Delta T \cdot r dr \right], \end{aligned} \quad (6)$$

де u – переміщення компаунда; α – коефіцієнт лінійного розширення.

У разі відсутності виводу розглядається тільки поверхня контакту компаунда і оболонки, тому, що $R_1 = 0$, $P_1 = 0$, $R = R2$. Також припустимо, що перепад температури по радіусу циліндра постійний $t(R_1) - t(R_2) = \Delta T$.

В такому випадку формула (6) набуде вигляду

$$u = R_2 \cdot \left(\alpha \cdot \Delta T - \frac{P_k \cdot (1-2\mu)}{E} \right). \quad (7)$$

Переходячи від P_k до q, враховуючи: $P_k = q - \frac{E \cdot h}{R \cdot D} \cdot \alpha \cdot \Delta T$, отримаємо кінцевий вираз для переміщення компаунда

$$u = \alpha \cdot \Delta T \cdot R_2 \cdot \left[1 + \frac{h}{R} \cdot (1-2\mu) \right] - q \cdot R_2 \cdot \frac{h^3 \cdot (1-2\mu)}{12 \cdot (1-\mu^2)}. \quad (8)$$

Розрахувати контактний тиск, який виникає на межі компаунда і оболонки можна з умови сумісності деформацій контактуючих поверхонь. Запишемо цю умову:

$$\begin{cases} r_2 = r_2(z) = \left(R - \dfrac{h}{2}\right) + y(z), \\ u(z) = y(z). \end{cases}$$

З умови сумісності деформацій, а також формули (8) можна записати

$$y(z) = \alpha \cdot \Delta T \cdot \left[\left(R - \frac{h}{2}\right) + y(z)\right] \cdot \left[1 + \frac{h}{R} \cdot (1 - 2\mu)\right] - \\ -q \cdot \left[\left(R - \frac{h}{2}\right) + y(z)\right] \cdot \frac{h^3 \cdot (1 - 2\mu)}{12 \cdot (1 - \mu^2)}. \quad (9)$$

Визначимо з цього рівняння y(z)

$$y(z) = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot \left(R - \dfrac{h}{2}\right) \cdot (1 - \mu) \cdot \left[1 + \dfrac{h}{R} \cdot (1 - 2\mu)\right] - q \cdot \left(R - \dfrac{h}{2}\right) \cdot \dfrac{h^3 \cdot (1 - 2\mu)}{12 \cdot (1 - \mu^2)}}{1 - \alpha \cdot \Delta T \cdot \left[1 + \dfrac{h}{R} \cdot (1 - 2\mu)\right] + \dfrac{q \cdot h^3 \cdot (1 - 2\mu)}{12 \cdot (1 - \mu^2)}}.$$

Для спрощення виразу позначимо:

$$a_1 = 1 - \frac{h}{R} \cdot (1 - \mu); \quad a_2 = \frac{h^3 \cdot (1 - 2\mu)}{12 \cdot (1 - \mu^2)}; \quad a_3 = R - \frac{h}{2}.$$

З урахуванням позначень формула (9) матиме вигляд

$$y(z) = \frac{(\alpha \cdot \Delta T \cdot a_1 - q \cdot a_2) \cdot a_3}{1 - \alpha \cdot T \cdot a_1 + q \cdot a_2}. \quad (10)$$

З останньої формули легко знайти граничні умови для *q(z)*, якщо вони відомі для *y(z)*. Найчастіше, останні задаються значеннями «y» і його похідних в граничних точках *z=0* і *z=1* на розглянутому інтервалі осі *z*. Таким чином, граничні умови будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned} q(z) &= \frac{\alpha \cdot t \cdot a_1 - 1}{a_2} + \frac{a_3}{a_2 \cdot (y(z) + a_3)}, \\ q'(z) &= -\frac{a_3 \cdot y'}{a_2 \cdot (y + a_3)^2}, \\ q''(z) &= \frac{a_3}{a_2 \cdot (y + a_3)^2} \cdot \left[\frac{2 \cdot y'^2}{y + a_3} - y'''\right], \\ q'''(z) &= -\frac{a_3}{a_2 \cdot (y + a_3)^2} \cdot \left[\frac{6 \cdot y'^3}{y + a_3} - \frac{6 \cdot y' \cdot y''}{y + a_3} - y'''\right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Тепер, якщо відомі граничні умови для *y(z)*, то із співвідношень (11) можна знайти граничні умови для *q*. З урахуванням формул (5)–(10) можна записати інтегральне рівняння відносно *q*:

$$q = -\frac{e^{\beta z} \cdot \cos \beta z}{8 \cdot \beta^3}\left(\int_0^z q e^{-\beta z}(\cos \beta z + \sin \beta z)dz + \bar{C}_1\right) + \\ + \frac{e^{\beta z} \cdot \sin \beta z}{8 \cdot \beta^3}\left(\int_0^z q e^{-\beta z}(\cos \beta z - \sin \beta z)dz + \bar{C}_2\right) + \\ + \frac{e^{-\beta z} \cdot \cos \beta z}{8 \cdot \beta^3}\left(\int_0^z q e^{\beta z}(\cos \beta z - \sin \beta z)dz + \bar{C}_3\right) - \\ - \frac{e^{-\beta z} \cdot \sin \beta z}{8 \cdot \beta^3}\left(\int_0^z q e^{\beta z}(\cos \beta z + \sin \beta z)dz + \bar{C}_4\right) = \\ = \frac{(\alpha \cdot \Delta T \cdot a_1 - q \cdot a_2) \cdot a_3}{1 - \alpha \cdot t \cdot a_1 + q \cdot a_2}. \quad (12)$$

Таким чином, з рівняння (12), підставляючи граничні умови, може бути знайдено контактний тиск на границі компаунда і оболонки. З формули (11) можна зробити висновок, що зі збільшенням прогину контактний тиск зменшується, тому розгерметизація конструкції починається в тому перерізі, де прогин оболонки мінімальний.

Також можна отримати вираз для розрахунку контактного тиску в разі тришарової схеми «вивід-компаунд-оболонка», якщо вважати два перших шари товстостінними циліндрами, а останній – оболонкою. Саме така конструкція має місце в вузлах захисту від вологи плівкових конденсаторів.

1.1. Розрахунок контактного тиску за схемою тришарового товстостінного циліндра

Розглянемо рис. 4, на якому показаний поперечний розріз конденсатора по вузлу захисту від вологи. Тут можна побачити перетин трьох циліндрів: суцільного виводу – 3, компаундного циліндра – 2, і корпусного циліндра – 1.

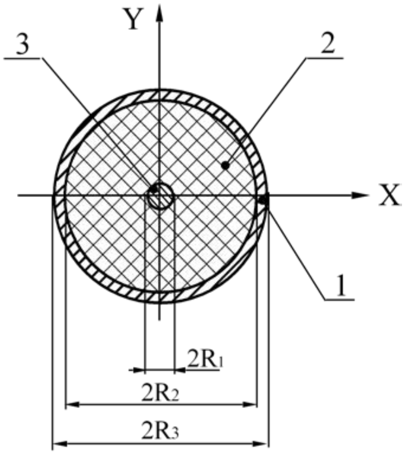

Рис. 4. Поперечний розріз конденсатора: 1 – вивід; 2 – компаунд; 3 – оболонка

Розрахунок контактного тиску, який виникає на межі поділу циліндрів, можна проводити за схемою тришарового товстостінного циліндра, що дозволить скористатися вже відомими формулами.

Введемо наступні позначення: P_{1k} – контактний тиск між першим і другим циліндром, P_{2k} – контактний тиск між другим і третім циліндром, E_i, α_i, $t_i(R)$ – відповідно модуль пружності, температурний коефіцієнт лінійного расширення, перепад температури по радіусу R_i-го циліндра (*i* = 1, 2, 3).

Скориставшись формулою (6), з огляду на те, що для першого циліндра внутрішній радіус дорівнює нулю, третій циліндр не навантажений зовнішнім тиском, а температурний перепад не залежить від радіуса, тобто $t(R_1) = t(R_2) = t(R_3) = \Delta T$, отримаємо наступні вирази:

– для першого циліндра:

$$u_{11} = R_1 \cdot \left(\alpha_1 \cdot \Delta T - \frac{P_{1k} \cdot (1 - 2\mu_1)}{E_1}\right),$$

– для другого циліндра:

$$u_{21} = \alpha_2 \cdot \Delta T \cdot R_1 + \\ + \frac{(1 - 2\mu_2)(R_1^3 P_{1k} - R_1 R_2^2 P_{2k}) + (1 + \mu_2)(P_{1k} - P_{2k}) R_1 R_2^2}{E_2(R_2^2 - R_1^2)}$$

$$u_{22} = \alpha_2 \cdot \Delta T \cdot R_2 + \\ + \frac{(1 - 2\mu_2)(R_1^2 P_{1k} - R_2^2 P_{2k}) R_2 + (1 + \mu_2)(P_{1k} - P_{2k}) R_2 R_1^2}{E_2(R_2^2 - R_1^2)},$$

– для третього циліндра:

$$u_{32} = \alpha_3 \cdot \Delta T \cdot R_2 + \frac{(1-2\mu_3)R_2^3 P_{2k} + (1+\mu_3)P_{2k}R_2R_3^2}{E_3(R_3^2 - R_2^2)},$$

де u_{ij} – переміщення викликане тиском i-го циліндра для j-го радіусу.

Використовуючи умови сумісності деформацій:

$$\begin{cases} u_{11} = u_{21}, \\ u_{22} = u_{32} \end{cases}$$

можемо знайти формули для контактного тиску:

$$\begin{cases} P_{1k} = \dfrac{(\alpha_1-\alpha_2)\Delta T + P_{2k}\cdot \dfrac{R_2^2\cdot(2-\mu_2)}{E_2(R_2^2-R_1^2)}}{\dfrac{1-2\mu_1}{E_1} + \dfrac{R_1^2(1-2\mu_2)+R_2^2(1+\mu_2)}{E_2(R_2^2-R_1^2)}}, \\ P_{2k} = \dfrac{(\alpha_2-\alpha_3)\Delta T + P_{1k}\cdot \dfrac{R_1^2\cdot(2-\mu_2)}{E_2(R_2^2-R_1^2)}}{\dfrac{R_2^2(1-2\mu_2)+R_1^2(1+\mu_1)}{E_2(R_2^2-R_1^2)} + \dfrac{R_2^2(1-2\mu_3)+R_3^2(1+\mu_3)}{E_3(R_3^2-R_2^2)}}. \end{cases} \quad (13)$$

Для спрощення введемо наступні позначення:

$$A_1 = \frac{R_2^2(2-\mu_2)}{E_2(R_2^2-R_1^2)}; \quad A_2 = \frac{R_1^2(2-\mu_2)}{E_2(R_2^2-R_1^2)};$$

$$C_1 = \frac{1-2\mu_1}{E_1} + \frac{R_1^2(1-2\mu_2)+R_2^2(1+\mu_2)}{E_2(R_2^2-R_1^2)};$$

$$C_2 = \frac{R_2^2(1-2\mu_2)+R_1^2(1+\mu_1)}{E_2(R_2^2-R_1^2)} + \frac{R_2^2(1-2\mu_3)+R_3^2(1+\mu_3)}{E_3(R_3^2-R_2^2)}.$$

Тоді формули (13) будуть мати вигляд:

$$\begin{cases} P_{1k} = \dfrac{(\alpha_1-\alpha_2)\Delta T + P_{2k}\cdot A_1}{C_1}, \\ P_{2k} = \dfrac{(\alpha_2-\alpha_3)\Delta T + P_{1k}\cdot A_2}{C_2}. \end{cases} \quad (14)$$

Вирішуючи отриману систему рівнянь відносно P_{1K} і P_{2K} отримаємо:

$$P_{1k} = \frac{C_2(\alpha_1-\alpha_2)\Delta T + A_1(\alpha_2-\alpha_3)T + A_1}{C_1},$$
$$P_{2k} = \frac{(\alpha_2-\alpha_3)\Delta T + P_{1k}\cdot A_2}{C_2}. \quad (15)$$

Напруження в циліндрах можна знайти за формулами:

$$\sigma_{r1} = P_{1k} \quad \sigma_{t1} = P_{1k},$$
$$\sigma_{r2} = \frac{P_{1k}R_2^2 + P_{2k}R_3^2}{R_3^2 - R_2^2} - \frac{(P_{1k}+P_{2k})R_2^2R_3^2}{R^2\cdot(R_3^2-R_2^2)},$$
$$\sigma_{t2} = \frac{P_{1k}R_2^2 + P_{2k}R_3^2}{R_3^2 - R_2^2} + \frac{(P_{1k}+P_{2k})R_2^2R_3^2}{R^2\cdot(R_3^2-R_2^2)}, \quad (16)$$
$$\sigma_{r3} = \frac{P_{2k}R_3^2 + P_2R_4^2}{R_4^2 - R_4^2} - \frac{(P_{2k}+P_2)R_4^2R_3^2}{R^2\cdot(R_4^2-R_3^2)},$$
$$\sigma_{t3} = \frac{P_{2k}R_3^2 + P_2R_4^2}{R_4^2 - R_3^2} + \frac{(P_{2k}+P_2)R_4^2R_3^2}{R^2\cdot(R_4^2-R_3^2)},$$

де R – поточний радіус, який змінюється для другого циліндра в межах $R_2 < R < R_3$, для третього циліндра – $R_3 < R < R_4$.

Висновки. За отриманими формулами можна розрахувати розподіл напружень в кожному елементі конструкції «вивід-компаунд-оболонка».

Ройзман В.П., Возняк А.Г.
Хмельницкий национальный университет

РАСЧЕТ КОНТАКТНОГО ДАВЛЕНИЯ В УЗЛАХ ВЛАГОЗАЩИТЫ АЛЮМИНИЕВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Аннотация
Статья посвящена расчету контактного давления в узлах влагозащиты на примере алюминиевых конденсаторов. Выведены формулы для расчета контактного давления по схеме трехслойного толстостенного цилиндра. Рассчитано распределение напряжений в каждом элементе конструкции.
Ключевые слова: компаунд, конденсатор, гермоузел, контактное давление, напряжение.

Royzman V.P., Voznyak A.G.
Khmelnitsky National University

CALCULATION OF CONTACT PRESSURE IN HYGIENE OF HYDROXYCYSTON ALUMINUM CAPACITORS

Summary
The article is devoted to the calculation of contact pressure in units of moisture protection on the example of aluminum capacitors. The formulas for calculating the contact pressure according to the scheme of a three-layer thick-walled cylinder are derived. The distribution of stresses in each element of the design is calculated.
Keywords: pressurization, compound, tension, contact pressure, shell.