

Література

1. Копей Б. В. Вдосконалення черв'ячних обертачів безперервної дії колони склопластикових насосних штанг / Б. В. Копей, Юй Шуанжуй, В. І. Орленко // Научный взгляд в будущее. – Вып. 2 (2), т. 5. – Одесса : Куприенко С.В., 2016. – С. 71–74.
2. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://unitech.com.ua/ua/shagovye-dvigateli/nema_23.

РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ РЕА ОСЕСИМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ

*Гонтар В. О., Макаришикін Д. А., Горошко А. В., Медзатий Д. М.
Хмельницький національний університет*

Тенденція до зниження масогабаритних характеристик, отриманню високої щільності електромонтажу і забезпечення герметичності радіоелектронної апаратури (РЕА) призвело до зниження жорсткості елементів, деталей і вузлів їх (достатньо складних) конструкцій. Експлуатація таких виробів з нових неметалевих матеріалів з недостатньо вивченими механічними властивостями в умовах експлуатації різноманітних об'єктів військової і цивільної техніки (ракет, літаків, бронемашин, судів, автомобілів, радіолокаційних станцій, стаціонарних та рухомих радіостанцій, комп'ютерів та ін.) за значних перепадів температури і тиску нерідко призводить до відмов через порушення цілісності окремих частин або розгерметизації. У електроніці через дію зовнішніх навантажень або недосконалих технологій виготовлення у виробах виникають напруження, від дії яких відбувається відхилення їх параметрів за межі технічних умов, що часто призводить до відмов ще задовго до поломок [1].

Конструкторські особливості сучасних РЕА обумовлюють необхідність спеціального вивчення питань їх міцності і герметичності, яким зараз приділяють недостатньо уваги, оскільки в процесі проектування і доведення РЕА дуже часто розглядаються лише їх електричні параметри. Що ж стосується конструкції герметичних РЕА, то тут основну увагу потрібно приділити вологозахисним властивостями застосованих в них полімерних матеріалів. У той же час їх механічна міцність і взаємодія з іншими складовими частинами конструкції можуть мати істотний вплив як на працездатність пристрою. Крім того, дуже рідко при проектуванні РЕА вивчається вплив їх механічних властивостей на значення електричних характеристик [2].

Проблемі механічної надійності та міцності елементів РЕА присвячено чимало наукових робіт. Так, автори роботи [3] наводяться результати досліджень високовольних резисторів з покриттям епоксидним герметиком, що застосовуються у імпульсних системах живлення, таких як електроприводи, зокрема у електричних автомобілях. У роботі [4] аналізується вплив фізико-механічних властивостей епоксидних формувальних сумішей та їх методи контролю на герметичність мікросхем у утворення різного виду дефектів. Відомі роботи Кофанова Ю.М., зокрема [5], що присвячені дослідженню забезпечення міцнісної надійності РЕА. Найбільш досліджуваними питання механічної міцності і герметичності електронних елементів РЕА містяться у роботах Ройзмана В.П. та його учнів, зокрема [6]. У цих роботах представлені результати з розробки розрахункових методів оцінювання міцності елементів циліндричної форми, охоплених герметиком, а також неруйнівні методи контролю міцності і технічного стану таких РЕА.

Найбільш перспективними для оперативного і досить достовірного дослідження міцності РЕА є теоретико-експериментальні методи, які могли б гармонійно поєднувати щодо нескладні інженерні розрахунки, які використовують достовірні характеристики досліджуваних виробів і легко перевіряються за допомогою експериментів.

Мета роботи полягала у розробці розрахункових методів оцінювання міцності осесиметричних компаундованих конструкцій елементів РЕА. Об'єктами дослідження були діоди, транзистори, конденсатори, фотодатчики, а також вузли гермовиводів, вікончаті вузли фоторезисторів та ін. (рис. 1).



Рис. 1. Об'єкти досліджень

Розглянемо скляну деталь, що має форму тіла обертання, спаяну з іншого боку, наприклад, металевій деталлю, яка охоплює скляну. Введемо наступні припущення: не враховуємо напруження, що виникають внаслідок зміни розмірів при склуванні, тобто усадку; вірним є закон Гука; істинною є гіпотеза плоских перетинів.

Розглянемо переріз вузла виводу через «будинковий» скло-спай. Скляний циліндр (середній) знаходиться під дією контактної тиску з боку оточуючих його металевих частин. В інших випадках, як наприклад, в діодах можна вважати, що стінки циліндра знаходяться під дією контактної тиску з боку компаундної частини і газу, що знаходиться всередині виробу: компаундний циліндр знаходиться під впливом контактних тисків зі боку скляної частини і навколишнього середовища. Отже, для всіх випадків слід розглянути розрахунок тіла обертання, що знаходиться під дією контактних тисків по обидва боки.

Нехай у загальному випадку циліндри навантажені внутрішнім контактним тиском P_1 і зовнішнім – P_2 . Позначимо r_1 і r_2 – внутрішній і зовнішній радіуси зовнішнього (металевого) циліндра (рис. 2).

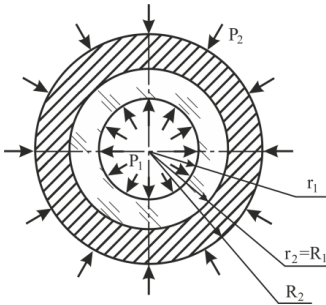


Рис. 2. Розрахункова схема типового вузла РЕА

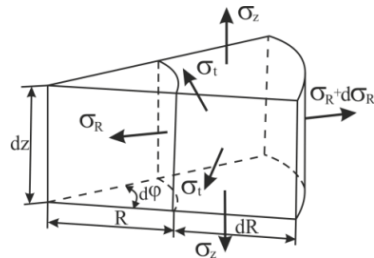


Рис. 3. Рівновага нескінченно малого елемента

Не порушуючи спільності, розглянемо зовнішній циліндр. Нехай він буде навантажений внутрішнім контактним тиском q (з боку стискає їм деталі) і зовнішнім P_2 . Якщо розглянути рівновагу нескінченно малого елемента (рис. 3) циліндра, утвореного двома поперечними площинами з відстанню dz між ними, двома осевими площинами, з куту $d\phi$ між ними і двома циліндрами радіусів R і $(R + dR)$ [7], то можна прийти до вже відомих формул Ляме:

– для зовнішнього металевого циліндра

$$U_i = \frac{1-2\mu_i}{\dot{A}_i} \cdot \frac{R_1^2 q - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2} R + \frac{1+\mu_i}{\dot{A}_i} \cdot \frac{R_1^2 R_2^2 (q - P_2)}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{R}, \quad (1)$$

$$\sigma_R = \frac{R_1^2 q - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{R_1^2 R_2^2 (q - P_2)}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{R^2}$$

$$\sigma_t = \frac{R_1^2 q - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{R_1^2 R_2^2 (q - P_2)}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{R^2}, \quad \sigma_z = \frac{q R_1^2 - P_2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2}, \quad (2)$$

– для внутрішнього скляного циліндра

$$U_c = \frac{1 - 2\mu_c}{\dot{A}_c} \cdot \frac{r_1^2 P_1 - r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2} r + \frac{1 + \mu_c}{\dot{A}_c} \cdot \frac{r_1^2 r_2^2 (P_1 - q)}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r}, \quad (3)$$

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 P_1 - r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{r_1^2 r_2^2 (P_1 - q)}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r},$$

$$\sigma_t = \frac{r_1^2 P_1 - r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{r_1^2 r_2^2 (P_1 - q)}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r^2}, \quad \sigma_z = \frac{P_1 r_1^2 - q r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (4)$$

де σ_R – радіальне напруження; σ_t – окружне (тангенціальне) напруження; σ_z – осьове напруження; U_m – радіальне переміщення зовнішнього металевго циліндра; U_c – радіальне переміщення внутрішнього скляного циліндра.

Розглянемо низку частинних випадків:

а) виріб навантажено тільки внутрішнім тиском ($P_2 = 0$), цей випадок відповідає роботі виробу в безповітряному просторі. Для металевої навколишньої частини:

$$U_i = \frac{1 - \mu_i}{\dot{A}_i} \cdot \frac{R_1^2 q \cdot R_2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{1 + \mu_i}{\dot{A}_i} \cdot \frac{R_1^2 R_2^2 q}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \frac{1}{R},$$

$$\sigma_R = \frac{R_1^2 q}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{R_1^2 R_2^2 q}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \frac{1}{R^2}, \quad \sigma_t = \frac{R_1^2 q}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{R_1^2 R_2^2 q}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \frac{1}{R^2}. \quad (5)$$

Для охопленої скляної частини виробу формули (3) – (4) залишаються без зміни. При цьому для зовнішнього циліндра найбільшими значення σ_t і σ_R будуть у внутрішній поверхні при $R = R_1$:

$$\sigma_R = -q, \quad \sigma_t = \frac{q(R_1^2 + R_2^2)}{R_2^2 - R_1^2}, \quad U_i = \frac{R_1 q}{\dot{A}_i} \cdot \left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} + \mu_i \right). \quad (6)$$

У зовнішній поверхні зовнішнього циліндра, при:

$$\sigma_R = 0, \quad \sigma_t = \frac{2R_1^2 q}{R_2^2 - R_1^2}, \quad U_i = \frac{R_2 \cdot R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \frac{q}{\dot{A}_i}. \quad (7)$$

Для внутрішнього циліндра $P_2 = 0$ на внутрішній поверхні ($r = r_1$):

$$U_c = \frac{r_1^3 P_1 (1 - \mu_c) - 2r_1 r_2^2 q + r_1 r_2^2 P_1 (1 + \mu_c)}{\dot{A}_c (r_2^2 - r_1^2)}, \quad \sigma_r = -P_1, \quad (8)$$

$$\sigma_t = \frac{P_1 (r_2^2 - r_1^2) - 2r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2}.$$

При $r = r_2$ формули (3) – (4) набувають вигляду:

$$U_c = \frac{2r_1^2 r_2 P_1 - r_2^3 q (1 - \mu_c) - 2r_2 r_1^2 q (1 + \mu_c)}{\dot{A}_c (r_2^2 - r_1^2)}, \quad \sigma_r = -q, \quad (9)$$

$$\sigma_t = \frac{2r_1^2 P_1 - q (r_2^2 - r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2};$$

б) циліндр навантажений тільки зовнішнім тиском P_2 ($P_1 = 0$).
Такий випадок має місце при роботі елементів, що знаходяться під впливом навколишнього тиску (аеро- або гідростатичного), у яких з внутрішніх порожнин перед герметизацією відкачане повітря. Для металевий навколишньої частини:

$$U_i = \frac{1 - \mu_i}{\dot{A}_i} \cdot \frac{R_1^2 q \cdot R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2} R + \frac{1 + \mu_i}{\dot{A}_i} \cdot \frac{R_1^2 R_2^2 (q - P_2)}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \frac{1}{R},$$

$$\sigma_R = \frac{R_1^2 q - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{R_1^2 R_2^2 (q - P_2)}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \frac{1}{R^2},$$

$$\sigma_t = \frac{R_1^2 q - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{R_1^2 R_2^2 (q - P_2)}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \frac{1}{R^2},$$

тобто виходять вирази (1) – (3). Вважаючи, що $R = R_1$, а потім $R = R_2$, знайдемо U_m , σ_R , σ_t на внутрішній і зовнішній поверхнях охопленого циліндра ($R = R_1$):

$$U_i = \frac{R_1^3 q(1 - \mu_i) - 2R_1 R_2^2 P_2 + R_1 R_2^2 q(1 + \mu_i)}{\mathring{A}_i (R_2^2 - R_1^2)}, \quad \sigma_R = -q, \quad (10)$$

$$\sigma_t = \frac{q(R_2^2 + R_1^2) - 2R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2}$$

при $R = R_2$

$$U_i = \frac{R_2 P_2 (1 - \mu_i)}{\mathring{A}_i}, \quad \sigma_R = -E_2, \quad \sigma_t = \frac{2R_1^2 q - P_2 (R_2^2 + R_1^2)}{R_2^2 - R_1^2}. \quad (11)$$

Досліджуємо, як зміняться ті ж величини для внутрішнього (скляного) циліндра при $P_1 = 0$:

$$U_c = -\frac{1 - \mu_c}{\mathring{A}_c} \cdot \frac{r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2} r - \frac{1 + \mu_c}{\mathring{A}_c} \cdot \frac{r_1^2 r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r}, \quad (12)$$

$$\sigma_r = -\frac{r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{r_1^2 r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r^2}, \quad \sigma_t = -\frac{r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{r_1^2 r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r^2}. \quad (13)$$

При $r = r_4$ на внутрішній поверхні охопленого циліндра:

$$U_c = -\frac{2r_1^2 r_2^2 q}{\mathring{A}_c (r_2^2 - r_1^2)}, \quad \sigma_r = 0, \quad \sigma_t = -\frac{2r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2}. \quad (14)$$

На зовнішній поверхні охопленого циліндра (при $r = r_2$):

$$U_c = \frac{r_2 q}{\mathring{A}_c} \left(\mu - \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right), \quad \sigma_r = -q, \quad \sigma_t = -\frac{q(r_2^2 + r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2} \quad (15)$$

Величина контактної тиску q може бути знайдена з умови спільності деформацій на поверхні розділу «метал–скло». Для отримання умови міцності при проектуванні конструкції необхідно розрахувати максимальне напруження від дії всіх факторів і порівняти його з граничним, знайденим не тільки з теоретичної міцності, але і з урахуванням реальних дефектів.

1. Для визначення переміщень, радіальних і окружних напружень в будь-якій точці циліндра (при $P_1 \neq 0$ і $P_2 \neq 0$) служать вирази:

для металічного циліндра, що охоплює скло – залежності (1), (2); для внутрішнього скляного циліндра – (3), (4).

2. В частинному випадку, коли зовнішній тиск $P_2 = 0$, для визначення переміщень і напружень в будь-якій точці служать вирази (5) – для зовнішнього циліндра; (2) – для внутрішнього. На внутрішніх поверхнях циліндрів перераховані параметри в цьому випадку визначаються за формулами (6) – для зовнішнього циліндра; (7) – для внутрішнього. На зовнішніх поверхнях: (7) – для зовнішнього циліндра; (8) – для внутрішнього.

3. Якщо внутрішній тиск $P_1 = 0$, для визначення переміщень і напружень в будь-якій точці циліндра служать вирази (1), (2) – для зовнішнього циліндра; (12), (13) – для внутрішнього. На внутрішніх поверхнях циліндрів перераховані параметри визначаються за формулами (10) – для зовнішнього циліндра; (14) – для внутрішнього. На зовнішніх поверхнях циліндрів для визначення переміщень служать вирази (11) – для зовнішнього циліндра; (15) – для внутрішнього.

Отримані залежності дають змогу оцінити міцність конструкцій на етапі проектування РЕА.

Література

1. Ройзман В. П. Проблема прочностной надежности в радиоэлектронике / В. П. Ройзман // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – С. 6–12
2. Ройзман В. П. Механика в электронике : монография : [в 3 т.] Т. 1. Статическая прочность / В. П. Ройзман. - Хмельницкий : ХНУ, 2015. – 313 с.
3. Evaluation of epoxy coated resistors in high voltage DC surge environments / Zirnheld J. et al. // 2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). – IEEE, 2016. – С. 715–717.
4. Monitoring of properties of epoxy molding compounds used in electronics for protection and hermetic sealing of microcircuits / A. N. Kocatev et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 665. – № 1.
5. Kofanov Y. N. Method of increasing the reliability of on-board electronic equipment with an analysis of reserves for the electrical, thermal and mechanical loads / Y. N. Kofanov, S. Y. Sotnikova, S. A. Subbotin // 2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS). – IEEE, 2016. – С. 94–98.
6. Strength of electronic components encapsulated with compound under thermal impacts / J. Boiko, S. Petrashchuk, I. Kovtun, O. Repyuk //

Visnyk Universytetu «Ukraina». Informatics, Computer Science and Cybernetics. – 2019. – № 2 (23). – P. 142–150.

7. Сопротивление материалов / Г. С. Писаренко, В. А. Агареев, А. Л. Билета [та ін.]. – Київ : Техника. 1987. – 793 с.

ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ЛІГАТУР РІЗНОГО СКЛАДУ

Гречанюк І. Н.¹, Гречанюк В. Г.², Чорновол В. О.²

¹НПП «Элтехмаш», с. Винниця, Ватутина, 25, e-mail: eltechnic777@ukr.net

²Київський національний університет будівництва і архітектури
Повітрофлотський проспект, 31

До останнього часу лігатури, які містять в своєму складі алюміній, титан, тугоплавкі і рідкоземельні елементи імпортують в основному з РФ і КНР. Якість лігатур для виплавки спеціальних сплавів не завжди відповідає сучасним вимогам. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки дослідно-промислових електронно-променевих технологій отримання лігатур Ni–Y, Hf–Ni, Al–Mo, V–Al, Zr–Ti, Nb–Ti. Плавку більшості лігатур здійснювали на електронно-променевої плавильній установці L-4, яка оснащена чотирма газорозрядними гарматами потужністю по 100 кВт кожна.

Принципова схема виплавки всіх лігатур однакова. Вихідну шихту завантажують в мідну водоохолоджувальну проміжну ємність розмірами 300 × 300 × 60 мм, яка в процесі плавки служить тиглем. При цьому важливу роль відіграє рівномірний розподіл шихтових матеріалів по площі проміжної ємності, а також по висоті – більш легкоплавкі і летючі метали розташовують ближче до дна. Вага шихти, яка завантажується, становить від 10 до 20 кг залежно від щільності металів і їх компактності.

Після досягнення необхідного вакууму в $1,3 \cdot 10^{-1}$ Па плавку починають з поступового нагрівання поверхні розфокусованим променем при струмі 0,5–1,0 А і прискорюючій напрузі 30 кВ. На цьому етапі відбувається прогрів камери, видалення залишкової вологи, поліпшення вакууму і активна дегазація з поверхні матеріалів шихти. Тривалість цього етапу залежить від чистоти матеріалу шихти. Потім відбувається безпосередньо плавка концентрованим променем при струмі до 2,3 А, залежно від тугоплавкості матеріалів, вакуум підтримується $6,6 \cdot 10^{-2}$ – $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па.

Плавку зазвичай починають з одного кута, поступово переміщуючи рідку фазу по всій площі ємності. При цьому плавку ведуть