

УДК 539.4.019:621.319.4

А. В. ГОРОШКО, В. П. РОЙЗМАН

Хмельницький національний університет», Україна

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ ДИСКОВИХ КОНДЕНСАТОРІВ ШЛЯХОМ РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНИХ ЗАДАЧ МІЦНОСТІ

Побудовано математичну модель конструкції керамічний конденсатор-компаунд, виявлено причини її руйнування під час експлуатації конденсаторів в діапазоні температур $-50^{\circ}\text{C} \dots +60^{\circ}\text{C}$. Для моделі поставлено і розв'язано обернену задачу визначення множини допустимих значень фізико-механічних характеристик кераміки і компаунду, а також геометричних розмірів конструкції, при яких забезпечується міцність конструкції конденсаторів. Розроблено метод і засіб неруйнівного контролю, діагностування і прогнозування міцності дискових конденсаторів методом акустичної емісії.

Ключові слова: міцність, конденсатор, обернена задача, компаунд, фізико-механічні характеристики, акустична емісія.

Вступ

Дискові конденсатори представляють собою керамічні диски з металізованими торцями, до яких припаяно виводи. При герметизації цих конденсаторів епоксидними компаундами і наступному процесі термоциклювання часто відбувалось руйнування кераміки конденсаторів (рис. 1). Причинами цього дефекту найчастіше є невдалі сполучення властивостей з'єднувальних матеріалів. Оскільки процеси герметизації і термоциклювання супроводжуються появою напружень в контактуючих матеріалах [1,2], у випадку, коли величини цих напружень в кераміці перевищують допустиме для даного матеріалу значення, може відбуватись руйнування конденсаторів [3,4].

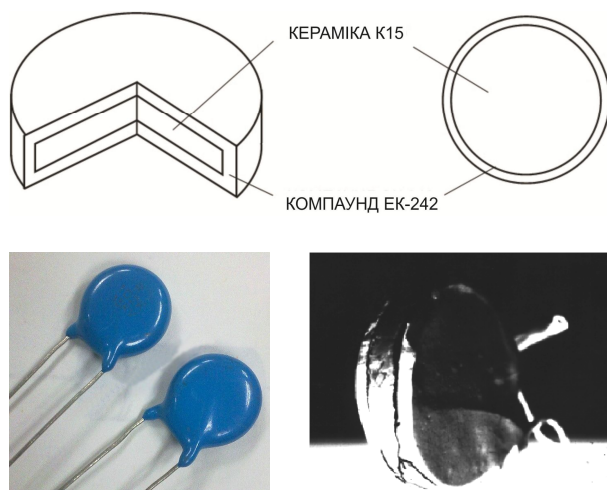


Рис. 1. Конденсатор типу К15-5 (закордонний аналог СТ81) і руйнування його кераміки

Постановка задачі досліджень

Сучасні підходи для розв'язання проблеми перевищення напруженнями на контакті кераміка-компаунд допустимих напружень для цих матеріалів полягають у зменшенні допустимих відхилень на фізико-механічні характеристики і геометричні розміри конструкції. В той же час бажано дати відповідь на питання: а якими мають бути ці допуски для забезпечення працездатності конденсаторів?

В роботі [5] одержано залежності для обґрунтованого призначення допусків на фізико-механічні і міцнісні характеристики полімерних матеріалів за рівнем геометричного виду дефектів, але такий підхід може бути застосований лише для відомих характеристик дефектів.

Відомі на сьогодні методи синтезу допусків, описано, наприклад, в роботах [6,7], для генерування точок простору вхідних параметрів і перевірки їх належності до області працездатності використовують метод Монте-Карло. Але навіть використовуючи найсучасніші комп'ютери, такий підхід викликає значні труднощі через відсутність інформації про закономірності випадкових процесів варіації параметрів і величезний обсяг необхідних при цьому обчислень для розв'язання таких задач зі стохастичними критеріями.

Одним із шляхів вирішення проблеми є розв'язання обернених задач. З метою пошуку причин появи дефектів і розробки заходів щодо їх усунення були поставлені дві обернені задачі: задача визначення тих первинних факторів, від яких залежить величина напружень в конструкції конденсатор-компаунд і задача пошуку такої множини їх значень, які забезпечували б виконання умов міцності для керамічних конденсаторів.

Побудова математичної моделі конструкції конденсатор-компаунд

Розв'язати поставлені обернені задачі означає визначити оптимальні області значень фізико-механічних характеристик матеріалів і геометричних розмірів сполучених елементів, що гарантують для кераміки конденсаторів виконання умови

$$\sigma_{\text{сквл}} \leq [\sigma_1]. \quad (1)$$

Для цього необхідно було визначити залежність лівої частини (1) від вказаних первинних факторів, тобто побудувати математичну модель досліджуваної конструкції. Для цього розглянемо розрахункову схему взаємодії керамічного диску з тією частиною компаунда, яка адгезує з його торцевими поверхнями. В подальшому всі величини, що характеризують кераміку, будемо позначати індексом 1, а компаунд – 2.

Розглянемо керамічний диск, який адгезує по торцях з компаундом. Вважаємо товщину диску H і товщину контактуючого шару компаунда h малими у порівнянні з радіусом R_1 диску (рис. 2) і внесемо наступні припущення: напруженнями від хімічної усадки компаунда нехтуємо; коефіцієнт лінійного температурного розширення (КЛТР) кераміки α_1 і компаунда α_2 відмінні, частіше $\alpha_1 < \alpha_2$; деформації підкоряються закону Гука, вірною є гіпотеза плоских перерізів; вважаємо, що температура поля диску і компаунда постійні за висотою і радіусом.

Герметизація керамічних дисків здійснюється за нормальної температури шляхом занурення їх в компаунд з наступним поміщенням конденсаторів у розігрітий до температури $+100^\circ\text{C}$ термошкаф. При цьому кожна із складових частин конструкції розширюється майже вільно. Після двох-трьох годинної витримки при вказаній температурі відбувається процес часткового утворення адгезійних зв'язків і полімеризації компаунда. При подальшому підвищенні температури і витримці конденсаторів протягом 18 годин при температурі $+150^\circ\text{C}$ ці процеси завершуються, після чого вільна деформація елементів конструкції вже неможлива, і на контактуючих поверхнях виникає розподілене по площі навантаження інтенсивності q (рис. 2). При стаціонарній температурі вважаємо його постійним по радіусу кола. Виділимо в диску двома співвісними циліндричними поверхнями радіусів r і $r + dr$, відповідно, і двома площинами, що проходять через вісь диску і такими, які утворюють між собою кут $d\varphi$, елемент товщиною H (рис. 2, 3). Аналогічний елемент товщини h виділимо в компаунді.

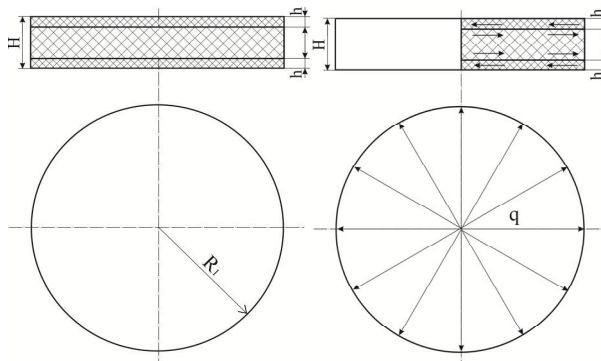


Рис. 2. Керамічний диск конденсатора, що адгезує по торцях з герметиком, і схема його навантаження

Подальші викладки виконаємо для кераміки, позначивши σ_r нормальні радіальні напруження на циліндричній поверхні елемента, що має радіус r , σ_{t1} - нормальні напруження на плоских бокових гранях елемента (окружні напруження). По циліндричній поверхні $r + dr$ радіальні напруження отримують приріст $d\sigma_r$.

Внаслідок осової симетрії диску і навантаження, дотичні напруження по бокових гранях елемента відсутні. Тому нормальні напруження є головними. Вказаний на рис. 2. напрям навантаження q будемо вважати додатним.

Помноживши напруження на площі граней, отримуємо діюче на елемент зусилля: $\sigma_r H d\varphi$ - на внутрішній циліндричній поверхні, $(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr) H d\varphi$ - на зовнішній, $\sigma_{t1} H dr$ - на бокових гранях, $q r d\varphi dr$ - на основах елемента.

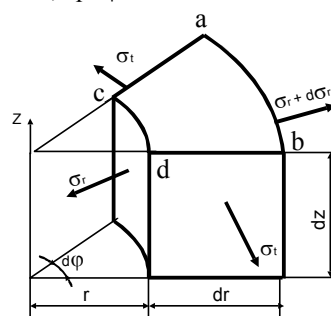


Рис. 3. Розрахункова схема конденсатора

Оскільки всі сили – компланарні вектори, а товщиною H у порівнянні з радіусом ми нехтуємо, то отриману систему сил можна вважати такою, що сходиться. Оскільки умова рівності нулю суми проєкцій всіх сил на напрям, перпендикулярний бісектрисі кута $d\varphi$, виконується тотожно, то для рівноваги елемента необхідно і достатньо, щоб сума проєк-

цій всіх сил на напрям вказаної бісектриси дорівнювала нулю. Покладаючи $\sin(d\varphi/2) \approx d\varphi/2$ і відкидаючи член третього порядку малості, після нескладних перетворень отримуємо:

$$\sigma_{r_1} + r \frac{d\sigma_{r_1}}{dr} - \sigma_{t_1} = -\frac{2q}{H}r. \quad (2)$$

Позначимо u_1 - радіальне переміщення циліндричної поверхні радіусу r . Тоді переміщення циліндричної поверхні радіусу $r + dr$ дорівнює $u_1 + du_1$, абсолютне радіальне видовження елемента дорівнює du_1 , а відносні радіальні та окружні видовження (деформації) елемента відповідно дорівнюють

$$\varepsilon_{r_1} = du_1/dr_1, \quad \varepsilon_{t_1} = u_1/r. \quad (3)$$

Скористаємось законом Гука для плоского напруженого стану елемента, позначимо E_1 - модуль пружності, μ_1 - коефіцієнт Пуассона матеріалу і, підставляючи в нього формули (3), отримуємо

$$\begin{aligned} \sigma_{r_1} &= \frac{E_1}{1-\mu_1^2} \left(\frac{du_1}{dr} + \mu_1 \frac{u_1}{r} \right), \\ \sigma_{t_1} &= \frac{E_1}{1-\mu_1^2} \left(\frac{u_1}{r} + \mu_1 \frac{du_1}{dr} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Підставляючи вираз (4) у (2) і зводячи подібні члени, отримуємо після нескладних перетворень

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{d(u, r)}{dr} \right] = -\frac{1-\mu_1}{E_1 H} \cdot 2q. \quad (5)$$

Розв'язок (5) за умов $|u_1| = \text{const}$ і $\sigma_{r_1} = 0$ при $r = k$ має вигляд

$$u_1 = -\frac{(1-\mu_1^2)2qr^2}{3E_1\mu} - \frac{1-\mu_1^2}{3E_1\mu} \cdot \frac{2+\mu_1}{1+\mu_1} \cdot 2qR_1r. \quad (6)$$

Тоді з (4) напруження в кераміці дорівнюють

$$\begin{aligned} \sigma_{r_1} &= \frac{2qR_1}{3H} (2+\mu_1) \left(1 - \frac{r}{R_1} \right), \\ \sigma_{t_1} &= \frac{2qR_1}{3H} (2+\mu_1) \left(1 - \frac{1-2\mu_1}{2+\mu_1} \cdot \frac{r}{R_1} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Аналогічні формули можна записати для елемента компаунда, якщо у (7) замість товщини H підставити h , а замість інтенсивності $2q$ підставити $-q$, враховуючи, що якщо кераміка розтягнута, то компаунд стиснутий і навантажений контактним

навантаженням тільки з одного торця.

$$\begin{aligned} \sigma_{t_2} &= -\frac{qR_1}{3h} (2+\mu_2) \left(1 - \frac{r}{R_1} \right), \\ \sigma_{t_1} &= \frac{qR_1}{3h} (2+\mu_2) \left(1 - \frac{1-2\mu_2}{2+\mu_2} \cdot \frac{r}{R_1} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Для визначення q запишемо умову сумісності деформацій

$$\varepsilon_{t_1} = \varepsilon_{t_2} \quad \text{при } r = R_1. \quad (9)$$

При перепаді температури t відносні окружні деформації за рахунок вільного розширення і під дією контактного навантаження q можуть бути представлені у вигляді

$$\varepsilon_t = E^{-1} (\sigma_t - \mu\sigma_r) + \alpha t. \quad (10)$$

Підставляючи в (10) значення напружень із (7) і (8) при $r = R_1$ і задовольняючи умову (9), отримуємо після нескладних перетворень

$$q = 3(\alpha_2 - \alpha_1) \cdot \left(\frac{2(1-\mu_1)}{HE_1} + \frac{1-\mu_2}{hE_2} \right)^{-1} \cdot \frac{t}{R_1}. \quad (11)$$

Підставляючи вираз (11) в формули (7) і (8), отримуємо вирази радіальних і окружних напружень. Із формули (11) випливає, що при $t > 0$, тобто при підвищенні температури, $q > 0$, тобто напрям q вибрано правильно. При $t < 0$, тобто зниженні температури, напрям q протилежний показаному на рис. 2.

Аналіз формул (7) і (8) показує, що абсолютні величини напружень в кераміці і компаунді збільшуються і зменшуються разом з ростом і зменшенням абсолютної величини контактного навантаження q і досягають максимальних значень при $r = 0$, тобто в центрі керамічного і компаундного дисків. Тому міцність кераміки і компаунда є сенс оцінювати за максимальними значеннями напружень, тобто при $r = 0$.

Проаналізуємо напружений стан керамічного диску. Під дією розподіленого навантаження q при від'ємному перепаді температури елемент диску, показаний на рис. 3, знаходиться під тиском в двох взаємно перпендикулярних напрямках радіальними і окружними напруженнями. При цьому, очевидно, він буде розтягуватись в напрямі повздовжньої осі Z . Дійсно, за узагальненим законом Гука осьові деформації

$$\varepsilon_{Z_1} = E_1^{-1} \left[\sigma_{Z_1} - \mu(\sigma_{r_1} + \sigma_{t_1}) \right], \quad (12)$$

де $\sigma_{Z_1} = 0$. Оскільки знаки σ_{r_1} , σ_{t_1} в центрі диску при від'ємному перепаді температури від'ємні, то $\varepsilon_{Z_1} > 0$. Отже, диск розтягується в напрямі осі Z . Вираз (12) показує, що міцність диску може бути описана, наприклад, теорією міцності Сен-Венана [8].

Однак, слід врахувати, що одночасно з вказаним раніше розтягом, в кераміці в осьовому напрямі виникають стискуючі напруження, викликані дією лише тієї частини компаунда, яка адгезує з циліндричною поверхнею диску.

При зниженні температури між розглянутою частиною компаунда і керамічним диском виникає направлена паралельно вісі циліндрів сила взаємодії \bar{N} (рис. 4), обумовлена різницею осьових деформацій кераміки і компаунда. Вираз для цієї сили, отриманий з умов рівності абсолютних осьових деформацій компаунда і кераміки, має вигляд

$$N = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)t}{1/\left[E_1\pi R_1^2\right] + 1/\left[E_2\pi(2R_1h + h^2)\right]}$$

Тоді стискуючі осьові напруження в кераміці і розтягуючі в компаунді мають вигляд (13), (14) (табл. 1). Формули для визначення контактної тиску P_{1k} , радіальних і окружних напружень в кераміці і компаунді, що адгезують лише по циліндричній поверхні, (16)...(18) наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Контактний тиск і напруження в елементах конструкції конденсатор-компаунд

Формули	№
$\sigma_{Z_1} = (\alpha_2 - \alpha_1)t \cdot \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \cdot \frac{R_1^2}{2R_1h + h^2} \right)^{-1}$	(13)
$\sigma_{Z_2} = (\alpha_1 - \alpha_2)t \cdot \left(\frac{1}{E_1} \cdot \frac{2R_1h + h^2}{R_1^2} + \frac{1}{E_2} \right)^{-1}$	(14)
$P_{1k} = (\alpha_1 - \alpha_2)t \times \left(\frac{1 - 2\mu_1}{E_1} + \frac{R_1^2(1 - 2\mu_2) + (R_1 + h)^2(1 + \mu_2)}{E_2[(R_1 + h)^2 - R_1^2]} \right)^{-1}$	(15)
$\sigma_{r_1} = \sigma_{t_1} = -P_{1k}$	(16)
$\sigma_{r2} = \frac{P_{1k}R_1^2}{(R_1 + h)^2 - R_1^2} \cdot \left(1 - \frac{(R_1 + h)^2}{R^2} \right)$	(17)
$\sigma_{t2} = \frac{P_{1k}R_1^2}{(R_1 + h)^2 - R_1^2} \cdot \left(1 + \frac{(R_1 + h)^2}{R^2} \right)$	(18)

Оскільки кераміка являє собою крихкий матеріал, що погано опирається розтягу, для оцінки міцності диску конденсатора може бути використана друга теорія міцності, за якою

$$\sigma_{\text{еквл}} = \sigma_{11} - \mu(\sigma_{12} + \sigma_{13}) \leq [\sigma_1], \quad (19)$$

де $\sigma_{11} \geq \sigma_{12} \geq \sigma_{13}$ - головні напруження в кераміці. В нашому випадку, в силу принципу суперпозиції, головні напруження є алгебраїчними сумами однойменних напружень, що виникають при адгезії кераміки і компаунда тільки по торцях, з однієї сторони, і лише по циліндричній поверхні - з іншої.

Відповідність між номерами головних напружень і назвами напружень можна встановити після алгебраїчного порівняння величин осьових, радіальних і окружних напружень.

Якщо умова (19) не виконується, то можливе руйнування керамічного диску. Можна запропонувати і іншу гіпотезу руйнування конденсатора від дії тільки контактної зусилля q . Розглянемо елемент (рис. 4), розташований біля зовнішньої поверхні конденсатора.

Зі сторони компаунда по площині торця кераміка піддається впливу лише розподіленого навантаження q , яке можна вважати дотичним напруженням $\tau = q$. Але за законом парності дотичних напружень таке ж τ діє і в площинах, перпендикулярних площині торця, і можна вважати, що виділений елемент знаходиться в умовах, близьких до чистого зсуву. Але тоді в площинах, нахилених під кутом 45° до торця, діють максимальні розтягуючі напруження $\sigma_1 = \tau$ і стискуючі $\sigma_3 = -\tau$. Таким чином, за будь-якого напрямку навантаження q , тобто при охолодженні або розігріві від вихідного рівноважного стану, конденсатор, крім стиску і зсуву, буде і під дією розтягу, чому кераміка опирається гірше, ніж іншим видам навантажень. І якщо значення q близьке до значення границі міцності кераміки на розтяг, то можливе її руйнування.

Для перевірки цих гіпотез нижче приведено результати розрахунків інтенсивності контактної навантаження і напружень в кераміці конденсатора К15-5, герметизованого епоксидним компаундом ЭК-242. Розрахунок виконаний при $t = 100^\circ\text{C}$, тобто при перепаді температури від $+40^\circ\text{C}$ (температура скловання компаунда) до -60°C (мінімальної температури термоударів).

При значеннях фізико-механічних характеристик компаунда і кераміки і геометричних розмірів елементів конструкції, приведених у таблиці 2, обчислене за формулою (11) контактне зусилля q дорівнює 6,17 МПа.

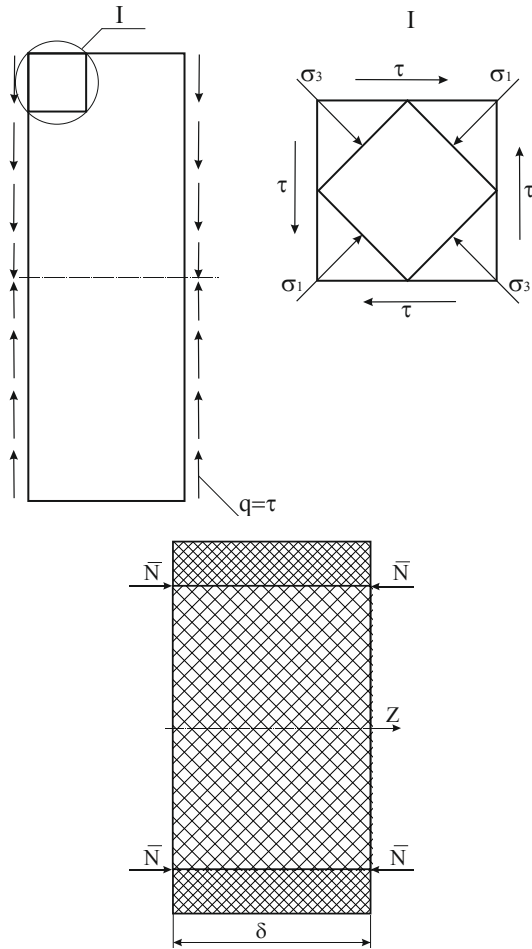


Рис. 4. Розрахункова схема осевих сил, що стискають кераміку, і напружень

Таблиця 3

Значення напружень в кераміці конденсаторів

Напруження, МПа	r/R ₁				
	0	0,25	0,5	0,75	1
σ _{Z1}	-30,227	-23,060	-15,897	-8,726	-1,567
σ _{t1}	-30,227	-25,213	-20,194	-15,180	-10,167
σ _{екв1}	15,890	12,112	8,337	4,553	0,786

Розраховані значення q і σ_{екв1} слід порівнювати зі значеннями границі міцності для кераміки. Шляхом випробувань зразків, виконаних з тієї ж кераміки, що і конденсатори, і статистичної обробки результатів експерименту, була отримана границя міцності кераміки при розтягу, що дорівнює 8 МПа. Аналізуючи дані таблиці 3, можна зробити висновок про прийнятність першої гіпотези руйнування кераміки. Найбільш вірогідними випадками мають бути руйнування, що зароджуються у центрі керамічного диску. Через порівнюваність величин значень руйнуючих напружень і контактного зусилля q, можна припустити виконання і другої гіпотези руйнування по похилим площадкам.

Перевірка адекватності математичної моделі досліджуваному об'єкту

Для перевірки теоретичних висновків було поставлено наступний експеримент. 10 конденсаторів товщиною 0,52 · 10⁻² м до заливки піддавались трикратному термоциклюванню від +85°C до -60°C і пройшли це випробування без руйнувань. Після цього для виявлення ступеня впливу на міцність конденсаторів лише компаунда, що огортають торці конденсатора, 5 екземплярів із вказаних вище конденсаторів по циклічній поверхні були обмотані неадгезуючою до компаунда фтороплівкою товщиною 15 · 10⁻⁶ м. Інші 5 екземплярів конденсаторів для виявлення ступеня впливу лише компаунда, що огортає циліндричну поверхню, були по торцях закриті такою ж фтороплівкою. Підготовлені вказаним чином всі 10 конденсаторів пройшли весь цикл технології заливки і полімеризації компаунда без ушкоджень і піддавались термоударам. Після першого термоудару всі конденсатори опинились зруйнованими. Характер руйнування кераміки конденсаторів, що адгезують з компаундом лише по торцю, показаний на фотографіях (рис. 5). Напрямок тріщин показує, що руйнування кераміки відбулося від її деформації в осьовому напрямі або від розтягуючих зусиль, направлених під кутом 45° до площин зсуву, тобто торцевих площин кераміки, які з'єднано з компаундом. Таке руйнування добре описується

Таблиця 2

Значення первинних факторів конструкції конденсатор-компаунд

Кераміка				
α ₁ · 10 ⁻⁶ , град ⁻¹	E ₁ · 10 ⁵ , МПа	μ ₁	H · 10 ⁻² , м	R ₁ · 10 ⁻² , м
11	1,13	0,31	0,52	1,575
Компаунд				
α ₂ · 10 ⁻⁶ , град ⁻¹	E ₂ · 10 ⁵ , МПа	μ ₂	h · 10 ⁻² , м	R ₁ · 10 ⁻² , м
35	0,092	0,34	0,1	1,575

Розраховане за формулою (15) значення контактного тиску P_{1к} склало 1,567 МПа. Аналіз результатів розрахунків показав, що максимальні напруження, які виникають у кераміці при адгезії з компаундом по циліндричній поверхні, у 18 разів менші напружень, що виникають при адгезії по торцевим поверхням. Знайдене за формулою (13) значення σ_{Z1} дорівнює -2,851 МПа. Сумарні значення радіальних і окружних, а також еквівалентних напружень в кераміці приведені у таблиці 3.

другою теорією міцності або моделлю чистого зсуву, наведеної вище. 5 конденсаторів, у яких торцеві поверхні були захищені від адгезії, опинились розгерметизованими через розтріскування компаунду по колу на границі торцевої і циліндричної частин конденсатора. Це розтріскування відбулось через вільне стискування компаунда по торцевій поверхні конденсатора і неможливість слідування за ним компаунда, нанесеного на незахищену циліндричну поверхню кераміки.

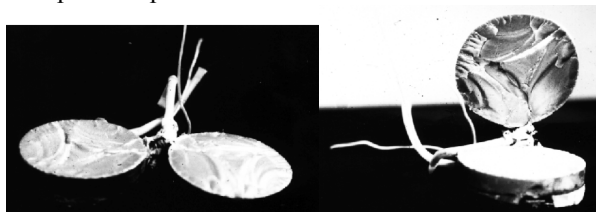


Рис. 5. Рельєф поверхні руйнування конденсатора

Отже, встановлено, що чим більше адгезія компаунда до кераміки і чим більше різниця в значеннях їх фізико-механічних характеристик, перш за все в КЛТР, тим вище значення зусиль зсуву при зміні температури від стану рівноваги і тим більші розтягуючі деформації.

Можливі шляхи підвищення міцності кераміки конденсаторів

Для забезпечення міцності кераміки можливі різні шляхи. По-перше, враховуючи, що міцність кераміки на стиск приблизно в 10 разів вище міцності на розтяг, слід спробувати шляхом підбору режиму спікання і відпалювання створити попередньо напружену (стиснуту) кераміку, щоб розтягуюча дія компаунда при зміні температури приводила лише до зниження стискуючих напружень. По-друге, можна випробувати захисні плівки, що не адгезують або слабо адгезують з керамікою, але адгезують з компаундом. По-третє, слід йти шляхом підбору таких компаундів, які мали б якомога меншу відмінність в КЛТР від кераміки, малу адгезію, але в той же час були б достатньо еластичними і не руйнувались самі при стискуванні в процесі охолодження. Для реалізації перших двох варіантів необхідні суттєві доробки технологічних процесів виготовлення і герметизації конденсаторів. Найтехнологічнішим видається третій шлях.

Розв'язання задачі оптимізації допусків на фізико-механічні характеристики компаунду

Для забезпечення міцності кераміки конденсаторів, виходячи із висловлених гіпотез руйнування,

необхідно було знайти компаунд з такими фізико-механічними характеристиками, близькими до відповідних характеристик кераміки, щоб виконувались умови (19) і

$$|q| \leq [\sigma_1]. \quad (20)$$

Близькість характеристик означає, що номінальні значення первинних факторів, що визначають властивості компаунда α_2, E_2, μ_2 , доцільно вибирати такими, що співпадають зі значеннями α_1, E_1, μ_1 (таблиця 2). Тоді в номінальній точці гарантовано виконання умов (19) і (20). Для того, щоб знайти максимальну кількість типів компаунду із вказаними властивостями, в якості критеріїв оптимальності природно прийняти функції виду

$$\delta_i \rightarrow \max, \quad i = 1, 2, 3, \quad (21)$$

з яких, з метою скаляризації задачі векторної оптимізації, утворюється згортка [9]

$$F_i = \max_{\{c_i\}_{i=1}^3} \left(\sum_{i=1}^3 c_i \delta_i \right). \quad (22)$$

Виходячи з апіорної оцінки ступеня впливу вказаних первинних факторів на величини напружень і контактного навантаження, коефіцієнти при допусках в згортці (22) взяті: при допуску на $\alpha_2 - c_1 = 0,6$, на $E_2 - c_2 = 0,25$, на $\mu_2 - c_3 = 0,15$. На первинні фактори і параметри моделі були прийняті наступні обмеження

$$11 \cdot 10^{-6} \leq \alpha_2 \leq 10 \cdot 10^{-5}, \quad 0,045 \cdot 10^5 \leq E_2 \leq 1,13 \cdot 10^5, \\ 0,31 \leq \mu_2 \leq 0,4, \quad 0,1 \cdot 10^{-2} \leq h \leq 0,11 \cdot 10^{-2}, \quad (23)$$

причому останнє обмеження взято з ТУ на конструкцію герметизованого конденсатора. В якості $[\sigma_1]$ взято значення 17 МПа. Перевірка виконання обмежень (19) і (20) на кожному кроці оптимізаційного процесу проводилась у вершинах паралелепіпедів.

Розв'язок задачі оптимізації, показав, що отримана область значень фізико-механічних характеристик настільки мала, що в ній не міститься жодної точки, що відповідає компаундам, які на сьогодні застосовуються. Тому було прийнято рішення розглянути більш міцну кераміку з $[\sigma_1] = 30$ МПа, а номінальне значення модуля пружності компаунда вибрати таким, що дорівнює значенню для компаунда ЭК-242. Тоді обмеження на значення цього первинного фактора мають вигляд

$$0,08 \cdot 10^5 \leq E \leq 0,092 \cdot 10^5, \quad \text{МПа.}$$

При цьому розширення області від номінальної точки передбачалось лише в сторону зменшення модуля пружності, оскільки при цьому зменшуються значення напружень в кераміці. Отже, було запропоновано пошук більш еластичних компаундів.

Отримано наступний розв'язок задачі оптимізації

$$\begin{aligned} 11 \cdot 10^{-6} &\leq \alpha_2 \leq 28 \cdot 10^{-6}, \\ 0,091 \cdot 10^5 &\leq E_2 \leq 0,092 \cdot 10^5, \\ 0,31 &\leq \mu_2 \leq 0,4. \end{aligned} \quad (24)$$

Аналіз результатів розв'язку показав, що серед компаундів, що використовувались до тепер, відсутній представник з фізико-механічними характеристиками, що задовольняють (24). Тому підприємству-виробнику було рекомендовано відмовитись від модифікацій відомих типів компаундів і зайнятись розробкою компаундів з принципово новими властивостями.

Неруйнівний контроль, діагностування і прогнозування міцності конденсаторів методом акустичної емісії

Через те, що на сьогодні велика кількість конденсаторів типу K15-5 експлуатуються у різноманітних дороговартісних відповідальних за безпеку системах літаків, відмова конденсаторів через розгерметизацію їх конструкції може привести до відмови цілого вузла і, як наслідок, загибелі літака, в цій ситуації важливо було, не відмовляючись від використання цих конденсаторів, не допустити їх руйнування в процесі експлуатації, тому була поставлена задача створення методу завчасного попередження про можливість їх руйнування. І в цій ситуації авторами було запропоновано і реалізовано метод і засіб неруйнівного контролю, діагностування і прогнозування міцності конденсаторів методом акустичної емісії (АЕ), який попереджає про можливість розгерметизації конденсаторів. Детальне викладення цієї роботи виходить за рамки цієї статті, тому нижче тезисно подаються лише основні результати розробки.

За допомогою шестиканальної станції акустичної емісії (АЕ) [10] і з застосуванням хвилеводу були проведені випробування конденсаторів на міцність при термоциклюванні. Конденсатори було поміщено у вакуумну камеру і проведено термоциклювання при температурах $-50^{\circ}\text{C} \dots +60^{\circ}\text{C}$ з одночасним записом сигналів АЕ.

Встановлено, що ефект Кайзера, тобто відсутність сигналів АЕ після перших двох термоударів, свідчить про нормальний стан міцності конструкції,

а після появи стійкої АЕ конденсатори витримують ще 8-10 циклів до руйнування конструкції. На основі аналізу отриманих результатів запропоновано спосіб неруйнівного діагностування та контролю міцності і попередження небезпечних станів конструкції керамічних конденсаторів К 15-5, які працюють в умовах термоциклювання від $+60^{\circ}\text{C}$ до -50°C :

– прояв ефекту Кайзера, тобто відсутність сигналів АЕ після перших двох термоударів, свідчить про нормальний стан міцності конструкції;

– якщо на n -му термоциклі знову з'являються сигнали АЕ, співрозмірні з сигналами, отриманими при першому циклі, то це є попередженням про початок процесу катастрофічного руйнування, і така конструкція буде зруйнована через 8-10 циклів;

– якщо при підвищенні температури від -50°C до -10°C з'являються сплески сигналів АЕ, то це свідчить про наявність і розвиток тріщини в конструкції.

В останніх двох випадках конструкція визнається дефектною. Було створено портативний прилад, який при появі АЕ вище граничного рівня сигналізував, що до руйнування конденсатора залишається ще 8-10 циклів (8-10 зльотів і посадок), тобто поява в кабіні пілота сигналу з цього приладу дозволяє долетіти до місця базування і після посадки звернутись до технічної служби про заміну конденсатора (вузла). При використанні приладу на Землі, є можливість періодичної, через 10 зльотів і посадок, перевірки міцності конденсаторів для запобігання їх руйнуванню.

Висновки

За допомогою побудованої математичної моделі конструкції дискового конденсатора виявлені первинні фактори, що впливають на величину виникаючих в конденсаторах напружень.

Шляхом розв'язання множинної оберненої задачі пошуку значень фізико-механічних характеристик компаунда, які забезпечують міцність керамічних конденсаторів, встановлено, що серед існуючих компаундів відсутній представник з потрібними характеристиками. Виробнику рекомендовано відмовитись від модифікацій відомих типів компаундів і зайнятись розробкою компаундів з принципово новими властивостями.

Для конденсаторів, що вже експлуатуються, розроблено метод неруйнівного контролю, діагностування і прогнозування міцності конденсаторів методом акустичної емісії і рекомендовано їх періодичне діагностування.

Література

1. Jäger, K. M. *Ac conductance and capacitance of carbon black polymer composites during thermal cycling and isothermal annealing [Text]* / K. M. Jäger, D. H. McQueen, J. Vilcakova // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2002. – Т. 35, №. 10. – С. 1068.
2. *Fracture toughness testing of small ceramic discs and plates [Text]* / S. Strobl et al. // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2014. – Т. 34. – №. 6. – С. 1637-1642.
3. Gee, M. G. *Mechanical testing of multi-layer ceramic capacitors [Text]* / M. G. Gee, R. Morrell // *EuroMat 91. Proc. 2nd European Conf. on Advanced Materials and Processes*. – 1991. – Т. 3. – С. 13-28.
4. Сидняев, Н. И. *Анализ физики отказов для оценки показателей надежности радиоэлектронных приборов современных радиолокационных систем [Текст]* / Н. И. Сидняев, В. П. Савченко, Д. В. Клочкова // *Инженерный журнал: наука и инновации*. – 2013. – №. 12. – С. 24.
5. Коваленко, В. А. *Исследование технологических дефектов, возникающих в производстве агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 1. Допуски на отклонения толщины формируемого изделия от проектного значения [Текст]* / В. А. Коваленко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 3. – С. 10–21.
6. Назаров, Д. А. *Алгоритм построения области работоспособности с детализированным квантованием области поиска [Текст]* / Д. А. Назаров // *Труды международного симпозиума «Надежность и качество»*. – 2009. – Т. 2. – С. 18-22.
7. Абрамов, О. В. *Оптимальный параметрический синтез по критерию запаса работоспособности [Текст]* / О. В. Абрамов, Я. В. Катусева, Д. А. Назаров // *Проблемы управления*. – 2007. – № 6. – С. 64-69.
8. Horgan, C. O. *Saint-Venant end effects in composites [Text]* / C. O. Horgan // *Journal of Composite Materials*. – 1982. – Т. 16, №. 5. – P. 411-422.
9. Рыков, А. С. *Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации [Текст]* / А. С. Рыков. – М. : МИСус, 2009. – 608 с.
10. Royzman, V. *The Practice of the Applying Acoustic Emission Phenomena for Nondestructive Control and Diagnosing of Technical State of Manufactured Articles [Text]* / V. Royzman, A. Goroshko, I. Kovtun // *12th IFToMM World Congress, Besanson (France), June 18-21, 2007*. – 2007. – № 1. – P. 6.

Поступила в редакцию 8.11.2015, рассмотрена на редколлегии 18.11.2015

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ДИСКОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ПУТЕМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ

А. В. Горошко, В. П. Ройзман

Построена математическая модель конструкции керамический конденсатор-компаунд, выявлены причины ее разрушения во время эксплуатации конденсаторов в диапазоне температур $-50^{\circ}\text{C} \dots +60^{\circ}\text{C}$. Для модели поставлена и решена обратная задача определения множества допустимых значений физико-механических характеристик керамики и компаунда, а также геометрических размеров конструкции, при которых обеспечивается прочность конструкции конденсаторов. Разработан метод и средство неразрушающего контроля, диагностирования и прогнозирования прочности конденсаторов методом акустической эмиссии.

Ключевые слова: прочность, конденсатор, обратная задача, компаунд, физико-механические характеристики, акустическая эмиссия.

ENSURING THE SAFETY OF DISK CAPACITORS BY SOLVING INVERSE DURABILITY PROBLEMS

A. V. Goroshko, V. P. Royzman

A mathematical model of ceramic compound capacitor has been designed. The causes of its destruction during the operation of the capacitors in the temperature range $-50^{\circ}\text{C} \dots +60^{\circ}\text{C}$ have been identified. The authors have posed and solved the inverse problem to determine the set of admissible values of physical and mechanical properties of ceramics and compounds, as well as the geometric dimensions of the structures, which provide the durability of capacitor structure. A method and means of nondestructive testing, diagnosis and prediction of capacitor durability by means of acoustic emission have been developed.

Key words: durability, capacitor, inverse problem, compounds, physical and mechanical properties, acoustic emission.

Горошко Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры физики и электротехники, Хмельницкий национальный университет, Украина, e-mail: iftommm@ukr.net.

Ройзман Вилен Петрович – д-р техн. наук, проф. каф. инженерной механики, Хмельницкий национальный университет, Украина, e-mail: royzman_V@mail.ru.