

## СИНТЕЗ ДОПУСКІВ ЯК МНОЖИННА ОБЕРНЕНА ЗАДАЧА МІЦНОСТІ ДИСКОВИХ КОНДЕНСАТОРІВ

<sup>1</sup>Горошко А.В., <sup>2</sup>Ройzman В.П. Хмельницький національний університет  
E-mail: iftomm@ukr.net<sup>1</sup>, Royzman\_V@mail.ru<sup>2</sup>

Дискові конденсатори, наприклад типу К15-5 (закордонний аналог СТ81) представляють собою керамічні диски з металізованими торцями, до яких припаяні виводи. При герметизації цих конденсаторів епоксидними компаундами і наступному процесі термоцилювання часто відбувалось руйнування кераміки конденсаторів (рис. 1). Причинами цього дефекту найчастіше є невдалі сполучення властивостей з'єднувальних матеріалів. Оскільки процеси герметизації і термоцилювання супроводжуються появою напружень в контактуючих матеріалах, у випадку, коли величини цих напружень в кераміці перевищують допустиме для даного матеріалу значення, може відбуватись руйнування конденсаторів.

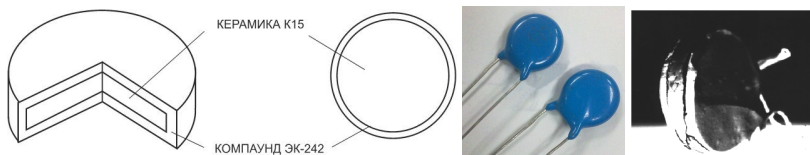


Рис. 1. Дисковий конденсатор і руйнування його кераміки

**Постановка задачі досліджень.** З метою пошуку причин появи дефектів і розробки заходів щодо їх усунення були поставлена задача моделювання конструкції конденсатора і визначення тих первинних факторів, від яких залежить величина напружень в конструкції конденсатор-компаунд і задача синтезу допусків (області працездатності), тобто обернена задача пошуку такої множини їх значень, які забезпечували б виконання умов міцності для керамічних конденсаторів. Таку сформульовану задачу назвемо *множинною оберненою задачею*, підкреслюючи тим самим, що її розв'язок передбачає визначення множини значень (області) в просторі первинних факторів. Цією обставиною вона відрізняється від традиційно розв'язуваних в багатьох галузях техніки точкових задач, в яких за наперед відомим вектором параметрів на виході, визначається лише один вектор первинних факторів чи (або) параметрів.

**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 працездатності

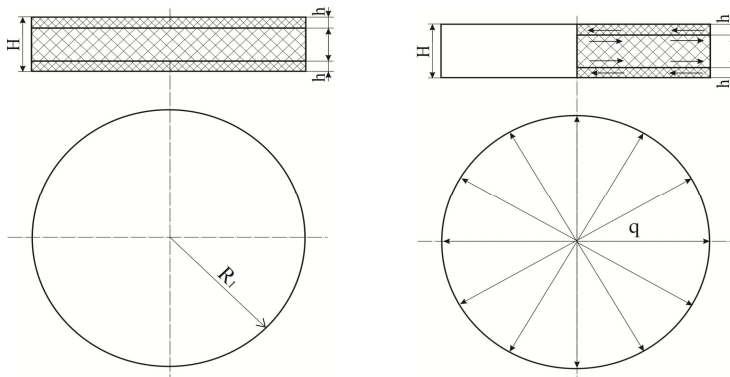
$$\sigma_{aea} \leq [\sigma], \quad (1)$$

де  $\sigma_{aea}$  – еквівалентні напруження у матеріалі конденсатора,  $[\sigma]$  – допустимі напруження у матеріалі.

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.

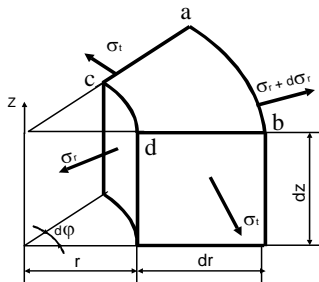
Покладемо товщину диску  $H$  і товщину контактуючого шара компаунда  $h$  малими порівняно з радіусом  $R_1$  диску (рис. 2) і внесемо наступні припущення: напруженнями від хімічної усадки компаунда нехтуємо; коефіцієнти лінійного температурного розширення (КЛТР) кераміки  $\alpha_1$  і компаунда  $\alpha_2$  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.

Після герметизації керамічних дисків 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.



**Рис. 2.** Керамічний диск конденсатора, що адгезує по торцях з герметиком

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. 3. Розрахункова схема конденсатора**

Подальші викладки виконаємо для кераміки, позначивши  $\sigma_{r1}$  нормальні радіальні напруження на циліндричній поверхні елемента, що має радіус  $r$ ,  $\sigma_{t1}$  – нормальні напруження на плоских бокових гранях елемента (окружні напруження). По циліндричній поверхні  $r + dr$  радіальні напруження отримують приріст  $d\sigma_{r1}$ .

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.

Встановлено, що стискуючі осові напруження в кераміці і розтягуючі в компаунді мають вигляд (2), (3), а формули для визначення контактного тиску  $P_{1k}$ , радіальних і окружних напружень в кераміці і компаунді, що адгезують лише по циліндричній поверхні, вигляд (4)–(7), табл. 1.

**Таблиця 1 – Контактний тиск і напруження в елементах конструкції “конденсатор–компаунд”**

Формула	Номер формули
$\sigma_{z1} = (\alpha_2 - \alpha_1) t \cdot \left( 1/E_1 + 1/E_2 \cdot R_1^2 / 2R_1 h + h^2 \right)^{-1}$	(2)
$\sigma_{z2} = (\alpha_1 - \alpha_2) t \cdot \left[ (2R_1 h + h^2) / (E_1 \cdot R_1^2 + 1/E_2) \right]^{-1}$	(3)
$P_{1k} = (\alpha_1 - \alpha_2) t \cdot \left( \frac{1 - 2\mu_1}{E_1} + \frac{R_1^2 (1 - 2\mu_2) + (R_1 + h)^2 (1 + \mu_2)}{E_2 [(R_1 + h)^2 - R_1^2]} \right)^{-1}$	(4)
$\sigma_{r1} = \sigma_{t1} = -P_{1k}$	(5)
$\sigma_{r2} = P_{1k} \cdot R_1^2 \cdot \left[ 1 - (R_1 + h)^2 / R^2 \right] / \left[ (R_1 + h)^2 - R_1^2 \right]$	(6)
$\sigma_{t2} = P_{1k} \cdot R_1^2 \cdot \left( 1 + (R_1 + h)^2 / R^2 \right) / \left[ (R_1 + h)^2 - R_1^2 \right]$	(7)

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

$$\sigma_{\text{aeal}} = \sigma_{11} - \mu(\sigma_{12} + \sigma_{13}) \leq [\sigma_1], \quad (8)$$

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 (8) не виконується, то можливе руйнування керамічного диску.

Адекватність розробленої математичної моделі досліджуваному об'єкту бела перевірена експериментально, зокрема, встановлено, що чим більше адгезія компаунда до кераміки і чим більше різниця в значенням їх фізико-механічних характеристик, перш за все в КЛТР, тим вище значення зусиль зсуву при зміні температури від стану ривноваги і тим більші розтягуючі деформації.

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'язок множинної оберненої задачі синтезу 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 виконувалась умова (8).

Близькість характеристик означає, що номінальні значення первинних факторів, які визначають властивості компаунда  $\alpha_2, E_2, \mu_2$  доцільно вибирати такими, що співпадають зі значеннями  $\alpha_1, E_1, \mu_1$  (табл. 2). Тоді в номінальній точці гарантовано виконання умови (8).

**Таблиця 2 – Значення первинних факторів конструкції конденсатор-компаунд**

Кераміка				
$\alpha_1 \cdot 10^{-6}$ , град. <sup>-1</sup>	$E_1 \cdot 10^5$ , МПа	$\mu_1$	$H \cdot 10^{-2}$ , м	$R_1 \cdot 10^{-2}$ , м
11	1,13	0,31	0,52	1,575
Компаунд				
$\alpha_2 \cdot 10^{-6}$ , град. <sup>-1</sup>	$E_2 \cdot 10^5$ , МПа	$\mu_2$	$h \cdot 10^{-2}$ , м	$R_1 \cdot 10^{-2}$ , м
35	0,092	0,34	0,1	1,575

Для того, щоб знайти максимальну кількість типів компаунду із вказаними властивостями, в якості критеріїв оптимальності природно прийняти функції виду  $F_i = \delta_i \rightarrow \max$ ,  $i=1, 2, 3$ . Зводячи задачу векторної оптимізації до однокритеріальної за допомогою лінійної згортки критеріїв [3], маємо задачу у вигляді:

$$\tilde{F} = -\sum_{i=1}^n c_i \delta_i \rightarrow \min. \quad (9)$$

Виходячи з апіорної оцінки ступеня впливу вказаних первинних факторів на величини напружень і контактного навантаження, коефіцієнти при допусках в згортці (ранги), обчислені за методом парних порівнянь Т. Сааті [3], становлять: при допуску на  $\alpha_2 \Rightarrow c_1 = 0,6$ , на  $E_2 \Rightarrow c_2 = 0,25$ , на  $\mu_2 \Rightarrow c_3 = 0,15$ . Для первинних факторів і параметрів моделі були прийняті наступні обмеження:

$$11 \cdot 10^{-6} \leq \alpha_2 \leq 1 \cdot 10^{-4}, 4,5 \cdot 10^3 \leq E_2 \leq 1,13 \cdot 10^5, 0,31 \leq \mu_2 \leq 0,4, 10^{-3} \leq h \leq 1,1 \cdot 10^{-3}, \quad (10)$$

причому останнє обмеження взято з ТУ на конструкцію герметизованого конденсатора. В якості  $[\sigma_1]$  взято значення 17 МПа. Перевірка виконання обмежень (8) на кожному кроці оптимізаційного процесу проводилась у вершинах отриманих 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  $0,08 \cdot 10^5 \leq E \leq 0,092 \cdot 10^5$  МПа. При цьому розширення області від номінальної точки передбачалось лише в сторону зменшення модуля пружності, оскільки при цьому зменшуються значення напружень в кераміці. Отже, був запропонований пошук більш еластичних компаундів.

В результаті розв'язку задачі оптимізації отримано область працездатності виробу у вигляді:

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

Аналіз результатів розв'язку показав, що серед компаундів, які до тепер використовувались, відсутній представник з фізико-механічними характеристиками, що задовольняють (11), тобто існуючі компаунди не в змозі забезпечити працездатність конструкції конденсатора і при довільних сполученнях фізико-механічних характеристик кераміки і компаунду можлива поява дефектів. Тому підприємству-вироблювачу було рекомендовано відмовитись від модифікацій відомих типів компаундів і зайнятись розробкою компаундів з принципово новими властивостями.

Однак це зовсім не означає, що абсолютно всі вироби будуть дефектними. По-перше, область в просторі фізико-механічних характеристик, утворена значеннями реальних компаундів, може перетинатись з гіперпаралелепіедом, утвореним умовами працездатності (11). В цьому разі частина компаундів, значення фізико-механічних характеристик яких будуть належати множині точок тіла перетину, зможуть забезпечити умову працездатності виробу (8).

По-друге, оскільки внаслідок розкиду значень фізико-механічні характеристики кераміки в просторі будуть утворювати деяку область, при складанні виробів можливі випадки такого сполучення характеристик кераміки і компаунду, які забезпечать виконання умов працездатності. Тому необхідно забезпечити селективне складання вузлів, яке полягає у виборі партії матеріалів таким чином, щоб забезпечити виконання (8).

***Неруйнівний контроль, діагностування і прогнозування міцності конденсаторів методом акустичної емісії.*** Через те, що на сьогодні велика кількість конденсаторів типу К15-5 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 було важливо, 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 був запропонований і реалізований 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 і увійде до інших публікацій авторів.

**Висновки.** Побудована математична модель конструкції дискового конденсатора і виявлені первинні фактори, які впливають на величину виникаючих в конденсаторах напружень.

Розв'язана множинна обернена задача синтезу допусків на фізико-механічних характеристики компаунда, які забезпечують міцність керамічних конденсаторів. Показано, що серед існуючих компаундів відсутній представник зі значеннями характеристик, що задовольняють умовам оберненої задачі, і, отже, поставлена задача не має розв'язку.

Розроблено метод неруйнівного контролю, діагностування і прогнозування міцності конденсаторів методом акустичної емісії, що дало змогу продовжити їх експлуатацію, періодично їх діагностуючи.

### **Література**

1. Работнов Ю. Н. Сопротивление материалов / Ю. Н. Работнов. – М. : Физматгиз, 1963. – 456 с.
2. Брахман Т. Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике / Т. Р. Брахман. – М. : Радио и связь, 1984. – 287 с.
3. Saaty T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures / T. L. Saaty // *Journal of mathematical psychology*. – 1977. – Т. 15. – №. 3. – С. 234–281.
4. Royzman V. The Practice of the Applying Acoustic Emission Phenomena for Nondestructive Control and Diagnosing of Technical State of Manufactured Articles / V. Royzman, A. Goroshko, I. Kovtun // 12th IFToMM World Congress, Besanson (France), June18–21, 2007. – № 1. – 2007. – С. 6.

## **НАПРЯМИ ПІДВИЩЕННЯ СТУПЕНЯ ІДЕАЛЬНОСТІ НЕСУЧИХ СИСТЕМ ЗАЛІЗНИЧНИХ НАПІВВАГОНІВ**

*Кельріх М.Б., Фомін О.В.*

*Державний економіко-технологічний університет транспорту  
м. Київ, вул. Лукашевича, 19, e-mail: fomin1985@list.ru*

Успішне існування залізничного транспорту багато в чому залежить від ефективності конструкцій вантажних вагонів, які знаходяться в експлуатації. При цьому найбільш масовим та затребуваним серед вантажних вагонів є парк напіввагонів, на долю яких приходиться понад 50 % всього вантажообігу залізниць України. Проте результати розгляду технічного стану напіввагонів [1] вказали на те, що понад 80 % їх парку експлуатуються на грані призначеного терміну служби (22 роки), та сформовано з морально застарілих моделей. Зазначене аргументує необхідність розроблення, впровадження у вироб-