

## ПРОБЛЕМА МІЦНОСТІ КОМПАУНДОВАНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Проведено огляд існуючого стану проблеми міцності компаундованих електронних елементів в екстремальних умовах експлуатації. Проаналізовано фізико-механічні характеристики структурно складних полімерних матеріалів, які застосовуються в радіоелектроніці. Враховуючи великий розкид значень фізико-механічних параметрів полімерних матеріалів від наявних у них домішок, режимів затвердіння, впливу фізичної і механічної дії герметизованих електронних елементів, показана недостатня обґрунтованість наявних на сьогодні методів для визначення фізико-механічних властивостей герметизуючих матеріалів. Описана складність врахування усіх необхідних параметрів матеріалів, що використовуються, та недостатня вивченість полімерів, для проведення над ними розрахунків на працездатність в екстремальних умовах. Також проведено огляд існуючих експериментальних методів вимірювання напружень та методів розрахунку напружено-деформованого стану спряженої системи "герметизована конструкція – герметизуючий матеріал". Показано необхідність розробки математичної моделі для визначення напружень в спряженій системі "герметизована конструкція – герметизуючий матеріал" з урахуванням напружень від нерівномірності температурного розподілу. Вказано на необхідність проведення експериментальних досліджень натурних об'єктів для отримання реальних коефіцієнтів запасу міцності конструкцій виробів електронної техніки, через можливість суттєвих змін фізико-механічних властивостей полімеру, що можуть бути спричинені дією факторів зовнішнього середовища під час експлуатації. Стосовно специфіки виробів електронної техніки, розглянуті переваги і недоліки можливих методів експериментальних досліджень напружень та деформацій і виділено найперспективніший.

Ключові слова: герметизація, електронний елемент, виріб електронної техніки, міцність, полімери, фізико-механічні характеристики, тензометрія, тензометри, компаунд, кераміка, напруження, залишкове напруження, деформації, термоудар, напружено-деформований стан, герметизована конструкція.

*This paper represents the current problem of the strength of electronic components sealed in a compound in extreme operating conditions. Physical-mechanical properties of structurally complex polymeric materials, which are used in radio electronics, were analyzed. Current available methods to determine the physical and mechanical properties of sealing materials, which are described as inconsistent in regards to the large variation in the physical and mechanical parameters of polymeric materials, were shown. Such inconsistencies depend on existing impurity, solidification conditions, and physical and mechanical influences on sealed electronic components. The article describes the complexity of taking into account all necessary parameters and the lack of knowledge of polymers in order to calculate the operability in extreme conditions. Also, existing experimental methods of measuring strain and methods of calculating deflection modes for the conjugated system, the sealed construction - sealing material, were reviewed. The necessity for developing a mathematical model which considers uneven temperature distribution in order to calculate stress in the conjugated system, the sealed construction - sealing material, was shown. The necessity of experimentally researching physical prototypes in order to determine real safety factors in the designs of electronic equipment were emphasized. This is because of the possibility of significant changes in physical and mechanical properties of the polymer, which may be influenced by environmental factors during operation. With regard to the specifics of electronic equipment, the advantages and disadvantages of the possible methods of experimental studies of stress and strain were considered, and were singled out the most perspective one.*

Keywords: sealing, electronic element, electronic product, strength, polymeric compounds, physical-mechanical properties, tensometry, tensometers, compound, ceramic, stress, residual stress, deformations, thermal impact, deflected mode, sealed construction.

### Огляд існуючого стану проблеми

Конструкція будь-якого радіоелектронного виробу являє собою поєднання певної кількості вузлів і деталей, виготовлених з того чи іншого матеріалу, більша частина яких – неметалеві матеріали, що мають полімерну будову. Це пластичні маси, шаруваті пластики, кремнійорганічні полімери, компаунди, лаки, клеї, кераміка, силікатні скла, слюда та ін.

Номенклатура полімерних матеріалів настільки велика, а інформація про них настільки складна, що правильний вибір матеріалу для конкретних виробів електронної техніки (ВЕТ) представляє чималі труднощі. На практиці нерідко виникає необхідність комплексного використання полімерних матеріалів у конструкціях ВЕТ, так як поряд з електричними функціями полімери виконують роль конструкційних матеріалів.

Історично склалося так, що широке застосування в електроніці полімерних матеріалів відбулося в самий початковий період мініатюризації, коли виробы, які піддаються герметизації, мали ще значні розміри і володіли достатніми коефіцієнтами запасу міцності. У цей період характеристики полімерних матеріалів були слабо вивчені і основні роботи були присвячені вдосконаленню технології виробництва полімерів та технології герметизації ВЕТ. У міру мініатюризації ВЕТ з'явилася проблема міцності герметика і елементів, що герметизуються, а тому в літературі стали з'являтися рекомендації з оцінки взаємодії елементів і конструкцій з герметизуючими матеріалами.

Розвиток техніки висував перед інженерами все нові завдання, обумовлені ускладненням умов роботи ВЕТ. Це викликало появу робіт, в яких розглядалися розрахунки та методики випробувань апаратури при механічних і кліматичних впливах.

Слід зауважити, що в початковий період мікромініатюризації в радіоелектроніці застосування методів і засобів вимірювання деформацій і напружень, використовуваних в загальному машинобудуванні, було просто неможливо. Але на сьогодні прогрес техніки для вимірювання неелектричних величин електричними методами відкриває можливість для застосування деяких методів в електроніці.

#### **Аналіз фізико-механічних характеристик полімерних матеріалів**

Для працездатності герметизованих ВЕТ істотне значення має застосування полімерних герметизуючих матеріалів із заданими фізико-механічними властивостями. Тому певна кількість робіт присвячена вивченню фізико-механічних характеристик існуючих герметизуючих матеріалів, а також розробленню нових марок, поява яких викликана тією обставиною, що до теперішнього часу не існує герметизуючих матеріалів, характеристики яких повністю задовольняли б вимогам працездатності конструкцій ВЕТ.

Визначення цих характеристик здійснюється або експериментально шляхом випробувань дослідних зразків матеріалу, або теоретично шляхом розрахунків із залученням тих чи інших спрощених моделей, що описують процеси в полімерних матеріалах.

Відомо, що фізико-механічні властивості герметиків, зокрема, внутрішні напруження в них, багато в чому залежать від режимів затвердіння. Конкретні рекомендації по вибору режимів затвердіння для різних рецептур герметизуючих матеріалів наводяться в літературі [9], але в цих роботах не враховується вплив заповнення об'єму елементами схеми.

Існують формули для розрахунку коефіцієнта лінійного теплового розширення (КЛТР) герметиків, виходячи з об'ємного вмісту компонентів [9]. Проте ці формули не враховують механічної взаємодії наповнювача, зв'язуючого матеріалу і ряду інших факторів. Відома також формула для розрахунку модуля пружності композицій, зміцнених частками, але вона враховує тільки об'ємний вміст компонентів.

Фізико-механічні характеристики багато в чому залежать від складу полімерного матеріалу. Зокрема, введення пластифікаторів викликає зниження температури склування і модуля пружності, що обумовлює необхідність більш поглибленого вивчення міцності конструкцій ВЕТ, герметизованих такими матеріалами, наприклад, вивчення виникнення і розподілу залишкових напружень в зв'язуючому матеріалі на основі епоксидних смол [3].

Як стверджується в деяких роботах, необхідно визначати ті фізико-механічні показники герметиків, які слугують для характеристики та порівняння матеріалів, забезпечення даними для розрахунку та визначення експлуатаційних характеристик, контролю якості продукції саме в процесі виробництва. Об'єктивна наукова оцінка методів випробувань приводить до висновку про неправильність довільного застосування методів випробувань. Швидке зростання промисловості полімерів неминуче ставить практику попереду теорії, а складність властивостей полімерів обумовлює недостатність наших знань про матеріали.

У ряді випадків фізико-механічні характеристики, що приводяться в різних роботах навіть одного і того ж автора, мають істотну відмінність. Незважаючи на це, особливо цінним тут є отримані експериментально залежності фізико-механічних характеристик деяких компаундів від температури, але, на жаль, відсутні дані по розкиду цих характеристик.

Справа ускладнюється ще й тим, що компаунди мають композитну природу. Крім неоднорідності власного складу, на значення їх характеристик істотно впливають різні включення чужорідних тіл, з якими компаунди взаємодіють в конструкціях радіоелектронних частин приладів (РЕЧП). При виготовленні елементів РЕЧП широко використовують різні сорти кераміки, яка так само, як і компаунд, відноситься до полімерів і має композитну будову. Фізико-механічні характеристики кераміки або мають істотні відмінності за різними джерелами, або великий діапазон розкиду, або взагалі не визначені. Наприклад, для оксидної кераміки  $TiO_2$  модуль Юнга  $E=70...10^5$  ГПа, границя міцності на розтяг  $\sigma_b = 28...70$  МПа, границя міцності на стиск  $\sigma_{bc} = 281...843$  МПа [14], границя міцності при згині  $\sigma_3 = 281...843$  МПа; для кераміки марки 22ХС модуль Юнга  $E=280...320$  ГПа, КЛТР  $\alpha = 5,5...6,5 \cdot 10^{-6}$  1/град [15]; для кераміки марки ГМ  $\alpha = 6,2...7,6 \cdot 10^{-6}$  1/град,  $\sigma_{II} = 250...340$  МПа [16], по іншим характеристикам відомостей немає; для кераміки марки Фостерит з механічних характеристик відомий тільки  $\alpha = 9,4...10,3 \cdot 10^{-6}$  1/град [17–19].

Механічні властивості керамічних матеріалів визначають за результатами спеціальних нестандартизованих випробувань на розтяг, згин або стиск. З цих випробувань найбільш достовірні випробування зразків керамічних матеріалів на розтяг. Однак зразки при цьому досить складні у виготовленні і вимагають застосування спеціальних затискачів у випробувальних машинах. Зразки виготовляють у вигляді двох сполучених усічених конусів. Затискачі випробувальної машини виконують роз'ємними. Щоб виключити поверхневе руйнування зразка при контакті із затискачами поверхню затискачів покривають еластичним матеріалом.

Для випробувань на розтяг застосовують також зразки у вигляді короткого порожнього циліндра, які навантажуються внутрішнім гідростатичним тиском Р. Максимальне напруження в зразку визначають за формулою Ляме [6]:  $\sigma = P(D^2 + d^2)/(D^2 - d^2)$ , де D, d – зовнішній та внутрішній діаметри зразка відповідно.

Провівши аналіз роботи [3], присвяченої визначенню фізико-механічних характеристик компаундів, і роботи [2], присвяченої визначенню характеристик кераміки, слід зазначити, що, будучи проведеними на лабораторних зразках або спрощених теоретичних моделях, вони носять більше якісний, ніж кількісний характер, що істотно обмежує сферу застосування для реальних конструкцій. Між тим, практичні умови роботи полімерних матеріалів в ВЕТ у всьому робочому діапазоні температур настільки складні, що їх

повний теоретичний облік поки не проведений. Тому для визначення фізико-механічних характеристик цих матеріалів необхідні випробування, які відтворюють умови максимально наближені до експлуатаційних, для яких і здійснюється розрахунок на міцність [2, 3].

### **Огляд методів розрахунку напружено-деформованого стану і оцінка міцності системи "герметизована конструкція – герметизуючий матеріал"**

Механічні напруження в елементах герметизованих конструкцій можна умовно розділити на дві групи. До першої відносяться напруження, викликані механічними напруженнями в процесі виробництва і при експлуатації. Основною їх особливістю є те, що вони зникають після припинення дії зовнішнього механічного навантаження. До другої групи відносяться напруження, викликані дією температури на герметизовані конструкції в процесі виробництва, при кліматичних випробуваннях і експлуатації. Причинами напружень цього типу є відмінності в КЛТР матеріалів елементів, з яких складається герметизована конструкція. Такі напруження присутні у вигляді залишкових, якщо розглянуті елементи конструкції мають достатньо високу границю пружності [2].

Теоретичні методи розрахунку механічної міцності герметизованих ВЕТ розглядаються в роботах [5, 6]. Ці методи можуть привести до точних результатів тільки в тих випадках, коли математична модель досить добре відбиває реальну дійсність, а використовувані константи досить точні. Однак у цьому випадку розрахунок стає настільки складним, що практично, не може бути доведений до числового результату. Тому в ряді робіт наводяться наближені формули для розрахунку механічних напружень. Але ці формули або не враховують таких важливих характеристик, як модуль пружності і коефіцієнт Пуассона сполучених матеріалів і їх зміну від температури, або застосовні тільки при стаціонарних температурних режимах, або засновані на не зовсім коректних умовах спільності деформацій та ін.

Величини напружень, які виникають у герметиків і елементів ВЕТ, багато в чому залежать від значень фізико-механічних характеристик матеріалів, таких як КЛТР, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона.

У деяких роботах велика увага приділяється фізико-механічними процесам, що відбуваються в компаундах при полімеризації і механічних навантаженнях. Однак не розглядається взаємодія герметизуючого матеріалу з герметизованими елементами.

Важливі теоретичні висновки та рекомендації наведені в роботі [8]. Тут вказано на залежність від форми і взаємного розташування деталей, різних видів деформацій і напружених станів, обґрунтована необхідність застосування демпферуючих матеріалів, наведені функціональні залежності основних параметрів полімерів від різних кліматичних факторів. Однак формули та рекомендації, наведені в цій роботі, також носять більше якісний і описовий характер.

У роботах [2, 7] розглядається розрахунок напружень, що виникають в осесиметричних корпусах типу Т0-5. Герметичність корпусу забезпечується силами зчеплення компаунда і контактним тиском в місці сполучення ковпачка з підкладкою. Розміри ковпачка такі, що його слід розраховувати за схемою тонкостінної оболонки.

Вельми цікава робота [1], в якій викладена методика оцінки внутрішніх напружень в полярних діелектриках, їх міцності і теплопровідності на працездатність герметизованих ВЕТ. Тут досліджено причини виникнення внутрішніх напружень в компаундах, показані можливості їх зниження і приведений інженерний розрахунок температурних напружень. В роботі розглянуті експериментальні методи вимірювання внутрішніх напружень і стійкості компаундів до термоударів. Внутрішні напруження та контактні тиски визначаються по осесиметричній циліндричній моделі (задача Ляме) без урахування осьових деформацій, що вказує на можливість подальшого уточнення досліджуваної моделі. У роботі також не враховується закон зміни температури по радіусу виробу.

В роботі [4] для розрахунку механічних напружень, що виникають на границі компаунд - об'єкт, який захищається, прийнята модель, що досить точно відтворює реальні умови, в яких знаходяться герметизовані вироби (монолітний блок). Модель являє собою два кільця - феритове та алюмінієве, зазор між якими заповнений полімерною матрицею. У розглянутій моделі враховані зусилля, викликані хімічною усадкою компаунда при полімеризації, розходженням температурних коефіцієнтів розширення кілець при зміні температури, магніострикційними змінами розмірів феритового кільця. В якості теоретичної основи для визначення зусиль, що виникають у розглянутій моделі, також використана задача Ляме про осесиметричну деформацію труби з вільними кінцями, що знаходиться під дією внутрішнього тиску  $P_a$  і зовнішнього  $P_e$ . Однак модель не враховує осьові деформації, реальний розкид фізико-механічних характеристик матеріалів, що з'єднуються, закон розподілу температури по радіусу виробу. Розрахункові формули дозволяють визначити тільки максимальні значення напружень.

Для оцінки напружень в склоспаях [2, 7], які широко використовуються для герметизації металоскляних корпусів, придатні розрахункові схеми багатопарових складових циліндрів, насаджених один на один з натягом. Розрахунки виконані при стаціонарній різниці температур, без урахування осьових напружень і переміщень і в припущенні, що радіальні напруження уздовж осі циліндра розподілені рівномірно.

Загальним недоліком перерахованих вище розрахункових моделей є зневага напруженнями від нерівномірностей температурного розподілу. Для їх розрахунку потрібен реальний закон розподілу температури в кожному конкретному випадку. В роботі [10] розглядаються напруження від нерівномірного

нагрівання (охолодження) тіла циліндричної форми. Однак розглядаються лише прямолінійний і логарифмічний закони зміни температури по радіусу виробу. При цих законах неможливо обчислити значення напружень в будь-який момент часу. Також при такому способі визначення напружень від нерівномірностей температурного розподілу не враховується ступінь заповнення елементами об'єму герметизованої конструкції та їх взаємодія.

Аналіз робіт показує необхідність розробки математичної моделі для визначення напружень в спряженій системі "герметизована конструкція – герметизуючий матеріал" з урахуванням напружень від нерівномірності температурного розподілу, для чого потрібно знати реальний закон зміни температур у всьому об'ємі герметизованої конструкції і в об'ємі окремого елемента, із використанням достовірних характеристик досліджуваних виробів.

Завершуючи аналіз існуючих методів оцінки міцності ВЕТ, слід відмітити, що відомі теорії міцності не завжди можуть об'єктивно оцінювати працездатність конструкції з тієї причини, що в залежності від напруженого стану багато матеріалів можуть змінювати свої властивості (наприклад, переходити з крихкого стану в пластичне і навпаки). Тому оцінка реальних коефіцієнтів запасу міцності досліджуваних конструкцій ВЕТ в даний час можлива тільки при експериментальному дослідженні натурних об'єктів з подальшою обробкою отриманих результатів методами математичної статистики.

### **Методи вимірювання деформацій і оцінка можливості їх застосування для дослідження міцності герметизованих ВЕТ**

Методи вимірювання деформацій можна розділити на наступні групи: рентгенівські, поляризаційно-оптичні (методи фотопружності), муарових смуг, крихких покриттів, гальванічних покриттів і методи, засновані на перетворенні деформацій поверхні об'єкта дослідження за допомогою тензометрів і тензометричних перетворювачів.

Застосування рентгенівських променів для дослідження напруженого стану в металах і сплавах засноване на явищі дифракції рентгенівських променів при проходженні через кристалічну решітку досліджуваного матеріалу. Метод не можна використовувати для дослідження матеріалів з некристалічною структурою, для вимірювання пластичної складової деформації, а також для вимірювання одночасно в декількох точках. Зазначені вище недоліки методу і порівняно висока вартість обладнання обмежує його застосування при дослідженні міцності ВЕТ.

Метод крихких покриттів дозволяє визначати напруження тільки на зовнішніх поверхнях тіл. З приводу можливостей застосування цього методу в радіоелектроніці слід зауважити, що велика похибка вимірювань, а також той факт, що при висиханні покриття в досліджуваних деталях ВЕТ виникли б напруження, які могли б істотно змінити напружено-деформований стан мікроелектронних пристроїв і привести до відмов найбільш чутливих елементів, вкрай ускладнюють його застосування для дослідження мініатюрних ВЕТ.

Поляризаційно-оптичні методи (методи фотопружності) можна використовувати тільки для дослідження напруженого стану виробів електронної техніки на моделях, виготовлених з прозорого матеріалу. При об'ємних моделях значно ускладнюється техніка експерименту і не забезпечується необхідна точність визначення окремих компонентів напружень, до того ж, метод поки недостатньо розроблений для дослідження пружно-пластичних деформацій.

При використанні методу муарових смуг слід мати на увазі порівняно складну обробку результатів експерименту і неможливість визначити напружено-деформований стан внутрішніх деталей об'єкта, наприклад, елементів герметизованих ВЕТ.

Метод гальванічних покриттів може використовуватися тільки для дослідження статичних і динамічних навантажень в металевих матеріалах, що суттєво обмежує область його застосування.

Механічні і оптичні тензометри при дослідженні ВЕТ можуть застосовуватися тільки в лабораторних умовах при калібруванні інших видів тензометрів, точному вимірюванні деформацій великих деталей і визначенні механічних характеристик матеріалів, застосовуваних у ВЕТ.

Пневматичні тензометри застосовують тільки в лабораторних умовах при дослідженні на моделях. Вони вимагають ретельної фільтрації повітря від пилу і вологи та відсутності зовнішніх повітряних потоків, але мають високий коефіцієнт перетворення (близько 200000 при порозі реагування близько 0,1 е.о.д.).

Акустичні прилади [20] мають значну довжину бази. Датчик займає велику поверхню на об'єкті дослідження, що обмежує його застосування в мікроелектроніці.

Електричні тензометри [20] за принципом дії поділяються на тензометри опору (тензорезистори), індуктивні, ємнісні, п'єзоелектричні та індукційні.

Індуктивні тензометри в даний час мають базу до 0,5 мм, але їх габаритні розміри і вага ще досить великі, щоб їх можна було використовувати при дослідженні міцності мініатюрних ВЕТ.

Індукційні і п'єзоелектричні тензометри використовуються тільки для вимірювання динамічних деформацій.

Ємнісні тензометри можуть використовуватися в електроніці в основному в якості безконтактних чутливих елементів перетворювачів механічних величин (тиску, крутних моментів, вібрацій, точного вимірювання лінійних розмірів). В даний час їх застосування для вимірювання статичних деформацій обмежена, оскільки зміна ємності багато в чому залежить від діелектричної проникності повітряного зазору. Зміна його вологості і чистоти вносить значні похибки в вимірювання.

Електролітичні тензometri [21] через значні габарити і недостатню стабільність характеристик не можуть використовуватися в електронній техніці.

Механотроні прилади в основному застосовуються в якості чутливого елемента перетворювачів механічних величин при визначенні фізико-механічних характеристик матеріалів.

Тензорезистори [11] одержали широке поширення в техніці вимірювання деформацій завдяки можливості вимірювання деформацій при різних розмірах бази, починаючи з десятих часток міліметра, дистанційним вимірюванням на великому числі точок в широкому діапазоні частот і температур. Вони можуть бути придатні для оцінки напружень і деформацій ВЕТ, однак специфіка роботи ВЕТ і вживаних в них матеріалів [12] унеможливує пряме перенесення електротензометрії із загального і спеціального машинобудування в радіотехніку.

Кожен з описаних методів має певні переваги і недоліки та може бути найкращим в конкретних умовах. При відповідному доопрацюванні, стосовно специфіки виробів електронної техніки, широке застосування для дослідження напружень та деформацій у ВЕТ [13] може отримати метод електротензометрії, що має найменші обмеження в порівнянні з кожним з перерахованих методів.

### Висновки

1. Атестація фізико-механічних характеристик сучасних полімерних матеріалів, що застосовуються в радіоелектроніці, ускладнена через їх залежність від технології виробництва, форми виробу, способу і швидкості прикладання навантаження, температури і т.д. Це викликає необхідність розробки експериментального методу визначення цих характеристик в умовах, максимально наближених до умов експлуатації.

2. Показано необхідність розробки математичної моделі для визначення напружень в спряженій системі "герметизована конструкція – герметизуючий матеріал" з урахуванням напружень від нерівномірності температурного розподілу.

3. Найбільш широке застосування для дослідження напружень та деформацій в ВЕТ може отримав метод електротензометрії, що має найменші обмеження в порівнянні з кожним із перерахованих методів, при відповідному доопрацюванні стосовно специфіки виробів електронної техніки.

### Література

1. Галушко А.И. Внутренние напряжения в герметизирующих компаундах радиоэлектронной аппаратуры / Галушко А.И. – М. : Советское радио, 1974. – 104 с.
2. Кузнецов О.А. Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры / Кузнецов О.А., Погалов А.И., Сергеев В.С. – М. : Радио и связь, 1990. – 144 с.
3. Герметизация радиоэлектронной и электротехнической аппаратуры полимерными материалами : материалы краткосроч. науч.-техн. семинара, 16–17 мая / [под ред. И. М. Эрлиха]. – Л. : ЛДНТП, 1989. – 92 с.
4. Эрлих И. М. Кремнийорганические компаунды для герметизации РЭА : материалы экспресс-семинара, 15 мая / [под науч. ред. К. А. Бояджи]. – Л. : ЛДНТП, 1991. – 86 с.
5. Фізико-технічні основи мікроелектроніки / [В.А. Мокрецький, С.М. Дранчук, О.В. Андрієнов, С.В. Ленков, В.В. Зубарев]. – Одеса : ТВС, 2002. – 712 с.
6. Напряжения и деформации в элементах микросхем / [В.С. Сергеев, О.А. Кузнецов, Н.П. Захаров, В.А. Летягин]. – М. : Радио и связь, 1987. – 88 с.
7. Шайко-Шайковский А.Г. Конструктивно-технологические пути повышения статической прочности микроприборов РЭА, содержащих стеклоспаи и герметизируемых компаундами : дис. ... канд. техн. наук / Шайко-Шайковский А.Г. – Хмельницкий, 1982. – 217 с.
8. Пасынков В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – М. : Высшая школа, 1986. – 368 с.
9. Бондаренко О.Е. Конструктивно-технологические основы проектирования микросборок / О.Е. Бондаренко, Л.М. Федотов. – М. : Радио и связь, 1988. – 196 с.
10. Дайчик М.Л. Методы и средства натурной тензометрии : [справочник] / Дайчик М.Л., Пригоровский Н.И., Хуршудов Г.Х. – М. : Машиностроение, 1989. – 240 с.
11. Камбург В.Г. Моделирование температурных полей в сложных микромодулях, герметизируемых компаундом / В.Г. Камбург, Григоренко С.А., Ковтун И.И. //Вісник Технологічного університету Поділля. – Част. 3. – Спец. Випуск. – 2000. – №6. – С. 10 – 13.
12. Ройзман В. П., Ковтун И.И., Петрашук С.А. Термопрочность компаундированных пассивных электронных элементов //Труды третьей междунар. научно -практической конф. "Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ 2002). – Одесса: Одесский политехнический университет, ОАО "Нептун". – 2002. – С. 145.
13. Петрашук С.А. Защита электронных элементов в узлах с общей герметизацией от механических воздействий, вызванных действием температуры //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 2001. – №4. – С.43–46.
14. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования /Под редакцией Р. Г. Варламова. – М.: Сов. Радио, 1980. – 480 с.

15. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т./Под ред. Ю.В. Корицкого. – М.: Энергия, 1974. – Т.2. – 616 с.
16. Поляков А. А. Технология керамических радиоэлектронных материалов. – М.: Радио и связь, 1989. – 200 с.
17. Кузнецов О. А., Погалов А.И., Сергеев В.С. Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры. –М.: Радио и связь, 1990. – 144 с.
18. Тонкая техническая керамика: Пер. с японского /Под ред. Х. Янахида. – М.: Metallurgia, 1986. – 280 с.
19. Каленкович Н.И. Механические воздействия и защита радиоэлектронных средств: Учебник. – М.: Наука, 1989 – 365 с.
20. Ройзман В. П, Григоренко С. А. Міцність пасивнихелектронних компонентів, герметизованих компаундом, при термоударах // Вісник “Радіоелектроніка тателекомунікації”. – Львів: Вид-во Державного університету “Львівська політехніка”– 2000. – №387. – С. 265 – 270.
21. Камбург В.Г., Ковтун И.И., Григоренко С.А. Влияние температуры на механическую прочность пассивных электронных компонентов, герметизируемых компаундом //Надежность и качество. Книга трудов международного симпозиума. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та. – 2000. – С. 348 – 351.

## References

1. A.I. Galushko Vnutrennie naprjazhenija v germetizirujushhijh kompaundah radiojelektronnoj apparatury. Moscow, Sovetskoe radio, 1974. 104 s.
2. O.A.Kuznecov , A.I.Pogalov, V.S. Sergeev. Prochnost' jelementov mikrojelektronnoj apparatury. Moscow, Radio i svjaz', 1990. 144 p.
3. Germetizacija radiojelektronnoj i jelektrotehnicheskoy apparatury polimernymi materialami. Materialy kratkosroch. nauch.-tehn. seminaru, Leningrad, LDNTP, 1989. - 92 p.
4. I. M. Jerlih. Kremnijorganicheskie kompaundy dlja germetizacii RJeA, Leningrad, LDNTP, 1991. - 86 p.
5. V.A. Mokrec'kij, S.M. Dranchuk, O.V. Andrienov, S.V. Lenkov, V.V. Zubarev. Fiziko-tehnichni osnovi mikroelektroniki, Odesa, TVS, 2002. 12 p.
6. V.S. Sergeev, O.A.Kuznecov, N.P. Zaharov, V.A. Letjagin. Naprjazhenija i deformacii v jelementah mikroshem, Moscow, Radio i svjaz', 1987. 88 p.
7. A.G. Shajko-Shajkovskij. Konstruktivno-tehnologicheskie puti povyshenija staticheskoy prochnosti mikrop-riborov RJeA, sodержashhijh steklospai i germetiziruemyh kompaundami: Dis... kand. Tehn. nauk: - Hmel'nickij, 1982. - 217 p.
8. V. V.Pasynkov , V. S. Sorokin. Materialy jelektronnoj tehniki, Moscow, Vysshaja shkola, 1986. 368 p.
9. O.E.Bondarenko , L.M. Fedotov. Konstruktivno-tehnologicheskie osnovy proektirovanija mikrosborok, Moscow, Radio i svjaz', 1988. 196 p.
10. M.L.Dajchik , N.I.Prigorovskij , G.H. Hurshudov. Metody i sredstva naturnoj tenzometrii: Spravochnik, Moscow, Mashinostroenie, 1989. 240 p.
11. V.G.Kamburg , S.A.Grigorenko , I.I. Kovtun Modelirovanie temperaturnyh polej v slozhnyh mikromodu-ljah, germetiziruemyh kompaundom, Visnik Tehnologichnogo universitetu Podillja . , Volume 3, 2000, Issue 6, pp. 10-13.
12. V. P.Rojzman , I.I.Kovtun , S.A. Petrashhuk. Termoprochnost' kompaundirovannyh passivnyh jelektronnyh jelementov, in Conference Proceedings “Sovremennye informacionnye i jelek-tronnyje tehnologii (SIJeT 2002), Odessa, Odesskij politehnicheskij universitet, OAO “Neptun”, 2002, p. 145.
13. S.A. Petrashhuk. Zashhita jelektronnyh jelementov v uzlah s obshhej germetizaciej ot mehanicheskijh vozdejst-vij vyzvannyh dejstviem temperatury, Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah, Hmel'nic'kij, 2001, Issue 4, p.43-46.
14. Spravochnik konstruktora REA: Obschie printsipy konstruirovaniya, Moscow, Sov. Radio, 1980, 480 p.
15. Spravochnik po elektrotehnicheskim materialam: V 3 t. , Moscow, Energiya, 1974. Volume 2, 616 p.
16. A.A. Polyakov Tehnologiya keramicheskijh radioelektronnyh materialov, Moscow, Radio i svyaz, 1989, 200 p.
17. O.A.Kuznetsov , A.I.Pogalov , V.S. Sergeev Prochnost elementov mikroelektronnoy apparatury, Moscow, Radio i svyaz, 1990. - 144 p.
18. Tonkaya tehnicheskaya keramika, Moscow, Metallurgiya, 1986, 280 p.
19. Kalenkovich N.I. Mehanicheskie vozdeystviya i zaschita radioelektronnyh sredstv, Moscow, Nauka, 1989, 365 p.
20. Royzman V., Grigorenko S. MltsnIst pasivnih elektronnih komponentiv, germetizovanih kompaundom, pri termoudarah, VIIsnik “Radloelektronika ta telekomunikatsIYi”, LvIv, Vid-vo Derzhavnogo unIversitetu “Lvivska polItehnIka”, 2000, №387, P. 265 - 270.
21. Kamburg V.G., Kovtun I.I., Grigorenko S.A. Vliyanie temperatury na mehanicheskuyu prochnost passivnyh elektronnyh komponentov, germetiziruemyih kompaundom, Nadezhnost i kachestvo, in Conference Proceedings, Penza, Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2000, P. 348 - 351.

Надійшла 16.1.2013 р.

Статтю представляє: к.т.н. Горошко А.В.