

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій та радіотехніки

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему Теоретико-експериментальні методи розрахунку на міцність елементів електронної апаратури

ДРТР. 2017094.02.08.ПЗ

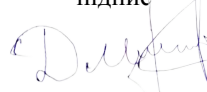
Виконав: студент 2 курсу, група ТР_м-18-2


підпис

В.О. Гонтар

Ініціали, прізвище

Керівник: д-р техн. наук, проф.



підпис

Д.А. Макаришкін

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, проф.


підпис

Ю.М. Бойко

Ініціали, прізвище

05 грудня 2020 р.

Хмельницький, 2020

Хмельницький національний університет

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій та радіотехніки

Освітній рівень другий (магістерський)

Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Освітня-професійна програма Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою ТР

Ю.М. Бойко

«07» вересня 2020р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Гонтару Віталію Олександровичу

1 Тема роботи: «Теоретико-експериментальні методи розрахунку на міцність елементів електронної апаратури»

керівник роботи Макаришкін Денис Олегович, к.т.н, доцент

Затверджено наказом по університету від «1» вересня 2020 р. № 118

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 02.12.2020 р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: підвищенні міцнісної надійності виробів електроніки, що мають циліндричну форму, на прикладі резисторів, фоторезисторів та конденсаторів, за рахунок розробки і удосконалення теоретико-експериментальних методів розрахунку на міцність

Об'єкт дослідження: механічна надійність телекомунікаційних і радіоелектронних пристроїв

Предмет дослідження: розрахунково-експериментальні методи досліджень міцності виробів електроніки, що мають циліндричну форму

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):

- *аналіз сучасного стану проблеми розрахунку на міцність елементів електронної апаратури;*

- *розробка і удосконалення математичних моделей оцінювання напруженого стану циліндричних елементів РЕА;*

- *розробка і удосконалення математичних моделей оцінювання напруженого стану компаундованих елементів РЕА;*

- *розрахунково-експериментальні методики оцінювання міцності елементів РЕА.*

Завдання отримав _____

Науковий керівник _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	1. Огляд проблеми розрахунку на міцність елементів електронної апаратури	18.09.2020	<i>виконано</i>
2	Формулювання задач досліджень	20.09.2020	<i>виконано</i>
3	2.1 Розрахунок напружень при впливі зовнішнього і внутрішнього контактного тиску	07.10.2020	<i>виконано</i>
4	2.2 Розрахунок напруження при довільних законах розподілу температури	14.10.2020	<i>виконано</i>
5	2.3 Розрахунок напружень напруження при одночасній дії тиску і температури	25.10.2020	<i>виконано</i>
6	3. Розробка математичних моделей оцінювання напруженого стану компаундованих елементів РЕА	31.10.2020	<i>виконано</i>
7	4. Створення розрахунково-експериментальних методик оцінювання міцності елементів РЕА	5.11.2020	<i>виконано</i>
8	Формулювання висновків до роботи	15.11.2020	<i>виконано</i>
9	Підготовка матеріалів для апробації	25.11.2020	<i>виконано</i>
10	Оформлення пояснювальної записки до ДР	25.11.2020	<i>виконано</i>
11	Оформлення презентаційних матеріалів	30.11.2020	<i>виконано</i>

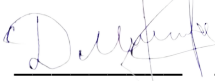
Студент


 Підпис

В.О. Гонтар

Ініціали, прізвище

Керівник роботи


 Підпис

Д.А. Макаришкін

Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Тема роботи: Теоретико-експериментальні методи розрахунку на міцність елементів електронної апаратури

Автор роботи: Гонтар Віталій Олександрович

Керівник роботи: Макаришкін Денис Анатолійович

Пояснювальна записка: 84 с., 15 рис., 3 табл., 2 дод., 56 джерел.

Графічна частина: 13 плакатів.

Ключові слова: виріб РЕА, герметик, вісесиметрична форма, міцність, герметичність, напруження, розрахунковий метод

Об'єктом дослідження є механічна надійність телекомунікаційних і радіоелектронних пристроїв.

Предметом дослідження є розрахунково-експериментальні методи досліджень міцності виробів електроніки, що мають циліндричну форму.

Мета роботи полягає у підвищенні міцнісної надійності виробів електроніки, що мають циліндричну форму, на прикладі резисторів, фоторезисторів та конденсаторів, за рахунок розробки і удосконалення теоретико-експериментальних методів розрахунку на міцність.

Методи, що використовувались при проведенні досліджень: аналіз статичної міцності; методи опору матеріалів, методи розв'язання задач теплопровідності; експериментальні дослідження електротезометричним методом; вимірні експериментальні засоби: вольтметри, генератори, осцилографи, вакуумна установка. Експериментальні дослідження проводились у лабораторії статичної і динамічної міцності виробів радіоелектроніки Хмельницького національного університету.

Результати роботи можуть бути використані на етапі проектування елементів конструкцій РЕА з конструкцією осесиметричної форми (резисторів, діодів, транзисторів, фото резисторів), герметизованих компаундом, а також під час навчання студентів галузі знань «Електроніка та телекомунікації» питанням конструювання і технології виробництва РЕА.

Практична значимість отриманих результатів полягає у економічному ефекті внаслідок підвищення міцнісної надійності циліндричних герметизованих елементів виробів РЕА.

ABSTRACT

Topic: research of durability of glass solders in REA products

Author of the work: Gontar Vitaliy Oleksandrovykh

Supervisor: Makarishkin Denis Anatoliyovych

Explanatory note: 84 pages, 15 figures, 3 tables, 2 appendices, 56 sources.

Graphic part: 13 posters.

Keywords: electronics product, sealant, axisymmetric shape, strength, tightness, stress, calculation method

The object of research is mechanical reliability of telecommunication and electronic devices.

The subject of research is computational and experimental methods for studying the strength of electronics products that have a cylindrical shape.

The purpose of the work is to increase the strength reliability of electronics products having a cylindrical shape, on the example of resistors, photoresistors and capacitors, by developing and improving theoretical and experimental methods of calculating the strength.

Methods used in the research: analysis of static strength; methods of resistance of materials, methods of solving problems of thermal conductivity; experimental researches by an electrotezometric method; measuring experimental means: voltmeters, generators, oscilloscopes, vacuum installation. Experimental studies were conducted in the laboratory of static and dynamic strength of radio electronics products of Khmelnytsky National University.

The results can be used at the design stage of CEA structural elements with axisymmetric design (resistors, diodes, transistors, photo resistors), sealed with compound, as well as during training of students in the field of knowledge "Electronics and Telecommunications" design and production technology REA.

The practical significance of the obtained results lies in the economic effect due to the increase in the strength reliability of cylindrical sealed elements of CEA products.

	С
ВСТУП	7
1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ.....	11
1.1 Проблема міцнісної надійності сучасних РЕА.....	11
1.2 Основні міцнісні параметри елементів РЕА.....	14
1.3 Огляд методів і засобів підвищення міцності і герметичності електронної апаратури, що герметизується компаундами.....	16
1.4 Огляд методів оцінювання міцності системи герметизувальних систем.....	21
Висновки до першого розділу. Постановка задач досліджень.....	25
2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕА.....	27
2.1 Контактні напруження при впливі зовнішнього і внутрішнього контактного тиску.....	29
2.2 Контактні напруження при довільних законах розподілу температури.....	36
2.3 Контактні напруження при одночасній дії тиску і температури...	39
Висновки до другого розділу.....	42
3 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ КОМПАУНДОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕА.....	43
3.1 Контактні тиски і напруження в виробках РЕА, що приводяться до схеми тришарових циліндрів при одночасній дії тиску і температури.....	43
3.2 Аналіз отриманих залежностей. Епюри напружень і тисків.....	47
Висновки до третього розділу.....	51
4 РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ РЕА.....	52
4.1 Методика визначення допустимого розкиду фізико-механічних	52

характеристик матеріалів, що використовуються при виготовленні РЕА	
4.2 Методика визначення температурних напружень у вільних і затиснених пластинах РЕА при довільних законах розподілу температури по радіусу.....	56
4.3 Розрахунок закону розподілу температури для круглої скляної пластини при склоспаюванні на індукційних установках.....	61
4.4 Методика визначення сумарних залишкових (і від надлишкового тиску) напружень в вузлах елементів РЕА.....	66
Висновки до четвертого розділу.....	75
ВИСНОВКИ.....	77
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	79
ДОДАТКИ.....	85
Додаток А. Матеріали презентації результатів виконання дипломної роботи.....	85
Додаток Б. Матеріали за результатами дипломної роботи, які були представлені для апробації	98

ВСТУП

Аналіз конструкторських особливостей сучасних РЕА показує, що розв'язання задач забезпечення вологозахисту і стійкості при змінах температури навколишнього середовища призвело до використання нових матеріалів з недостатньо вивченими властивостями, до з'єднання різнорідних матеріалів. Виниклі при цьому у таких конструкціях механічні взаємодії можуть викликати негативний вплив на електричні процеси, фізико-хімічні процеси в матеріалах, а також на працездатність електронного виробу. Проте роботи з проектування РЕА часто ведуться в основному лише у чисто радіотехнічному (схемному) напрямі, без необхідних розрахунків на міцність. Без вимірювання механічних напружень і оцінювання напруженого стану конструкцій в цілому та їх окремих елементів. Між тим сучасні вимоги і майбутнє радіоелектроніки, а також області її використання, висувають поряд з чисто радіотехнічними задачами проблему забезпечення механічної міцності і надійності.

Незважаючи на те, що питання міцності РЕА досліджували значна кількість учених, зокрема Alexander Roth, Zirnheld J., John Frederik Lancaster, Кофанов Ю.М., Ройзман В.П., Петрашук С.А., Ковтун І.І., Стрельбицкий В. В., на сьогодні проблема міцності РЕА до кінця не вирішена, а запропоновані багатьма авторами методи і засоби потребують вдосконалення через їх вузьку спеціалізацію, наукоємкість і складність застосування при проектуванні і технологічному процесі виробництва.

Загальною проблемою галузі телекомунікацій і радіотехніки, на вирішення якої спрямовані дослідження, описані в даній роботі, є підвищення надійності радіоелектронної і телекомунікаційної техніки.

Об'єктом дослідження є механічна надійність телекомунікаційних і радіоелектронних пристроїв.

Предмет дослідження – розрахунково-експериментальні методи досліджень міцності виробів електроніки, що мають циліндричну форму.

Метою дослідження є підвищення міцнісної надійності виробів електроніки, що мають циліндричну форму, на прикладі резисторів, фоторезисторів та конденсаторів, за рахунок розробки і удосконалення теоретико-експериментальних методів розрахунку на міцність.

Задачі дослідження:

1. Розробити математичну модель для розрахунку контактного тиску у металоскляних конструкціях деталей РЕА, що мають форму тіла обертання для оцінювання міцність конструкції за різних умов впливу зовнішніх і внутрішніх контактних тисків.

2. Розробити математичну модель, що описує зміни перепаду температури по радіусу елемента РЕА з вісесиметричною формою при довільних законах розподілу температури по радіусу виробу.

3. Удосконалити математичну модель, що описує контактні тиски і напруження, застосувавши схему тришарових циліндрів, при одночасній дії тиску і температури.

4. Розробити методику визначення допустимого розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів, що використовуються при виготовленні РЕА.

5. Розробити методику визначення температурних напружень у РЕА при довільних законах розподілу температури.

6. Розробити методику визначення закону розподілу температури для круглої скляної пластини при склоспаюванні на індукційних установках,

7. Розробити методику визначення сумарних залишкових напружень в вузлах елементів РЕА

Методи, що використовувались при проведенні досліджень: аналіз статичної міцності; методи опору матеріалів, методи розв'язання задач теплопровідності; експериментальні дослідження електротезометричним

методом; вимірювальні експериментальні засоби: вольтметри, генератори, осцилографи, вакуумна установка. Експериментальні дослідження проводились у лабораторії статичної і динамічної міцності виробів радіоелектроніки Хмельницького національного університету (ауд. 3-100).

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. *Удосконалено* математичну модель визначення контактного тиску (напружень) металоскляних конструкцій деталей РЕА, що мають форму тіла обертання (фоторезистори та ін.), *що дало змогу* оцінювати міцність конструкції за різних умов впливу зовнішніх і внутрішніх контактних тисків.

2. *Встановлено* залежність, що описує сім'ю статичних законів зміни перепаду температури по радіусу елементу РЕА, що мають вісесиметричну форму, *що дало змогу* визначати напруження при довільних законах розподілу температури по радіусу виробу.

3. *Удосконалено* математичну модель, яка описує контактні тиски і напруження, *що дало змогу* оцінювати міцність в елементах РЕА, що приводяться до схеми тришарових циліндрів, при одночасній дії тиску і температури.

Дослідження, описані в цій роботі, виконувались відповідно до виконання науково-дослідної роботи 2Б-2017 «Розробка наукових основ захисту виробів радіоелектроніки, закріплених на об'єднувальних платах, від деформацій плат, а плат від динамічних і теплових навантажень» та 3Б-2020 «Неруйнівний контроль, діагностування та прогнозування технічного стану електронних систем методом акустичної емісії в виробках військової і невійськової техніки».

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено практичні методики визначення:
- допустимого розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів, що використовуються при виготовленні РЕА, що полягає у розв'язанні задачі багатокритеріальної оптимізації;

- температурних напружень у вільних і затиснених пластинах РЕА при довільних законах розподілу температури по радіусу елемента.
- закону розподілу температури для круглої скляної пластини при склоспаюванні на індукційних установках, що дає можливість знаючи закон зміни температури по радіусу круглої скляної пластини, визначити контактний тиск, окружне, радіальне і осьове напруження.

2. Запропонована методика визначення сумарних залишкових (і від надлишкового тиску) напружень в вузлах елементів РЕА дає можливість оцінювати міцність конструкцій.

Результати роботи можуть бути використані на етапі проектування елементів конструкцій РЕА з конструкцією осесиметричної форми (резисторів, діодів, транзисторів, фото резисторів), герметизованих компаундом, а також під час навчання студентів галузі знань «Електроніка та телекомунікації» питанням конструювання і технології виробництва РЕА.

Практична значимість отриманих результатів полягає у економічному ефекті внаслідок підвищення міцнісної надійності циліндричних герметизованих елементів виробів РЕА.

Апробація результатів дослідження – публікація «Теоретико-експериментальні методи розрахунку на міцність елементів електронної апаратури» у збірнику праць 15-ї Міжнародної наукової конференції «Наука та освіта», 4-13 січня 2021 р., м. Хайдусобосло (Угорщина). - Хмельницький : ХНУ, 2020.

1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

1.1 Проблема міцнісної надійності сучасних РЕА

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. Вартість таких відмов буває занадто великою. Так, руйнування резистора вартістю 0,5 дол. призвело до втрати ракети вартістю 140 млн. дол., поломка виводів однієї з недорогих мікросхем призвело до втрати зв'язку з опущеним на Венеру працездатним апаратом [1].

При аналізі причин відмов у РЕА традиційно вважають, що 40-45% усіх відмов в експлуатації відбувається через помилки, що були допущені на етапах проектування, 20% обумовлено помилками при виробництві, 30% викликано порушеннями правил технічного обслуговування, близько 5-7% пов'язано з природнім зносом складових частин і старінням матеріалів. У наведеній класифікації, проте, не враховується тісний взаємозв'язок,

наприклад, конструкторських і технологічних причин відмов РЕА. Розв'язання проблеми забезпечення якості РЕА вимагає не лише врахування всіх етапів їх «життєвого циклу» (проектування, доведення, виробництво і експлуатація), але і взаємного впливу цих етапів. Ненадійність електронних виробів обумовлена недостатнім рівнем виробничої технологічності їх конструкції і застосованої елементної бази. Більш того, проекти деяких систем, в основу яких були покладені досить прогресивні принципи їх дії, залишились нереалізованими лише тому, що виявились недостатньо технологічними: занадто трудомісткими і непридатними для виробництва [1].

Найбільш загальною тенденцією у розвитку радіоелектронної техніки є сполучення все більшої інтеграції виконуваних нею функцій зі все більшою її мікромініатіризацією. Наслідком цього є різке ускладнення конструкцій сучасних РЕА. Це різко знижує можливість експериментального доведення (наладки і оптимізації) і, відповідно, вимагає сучасного відпрацювання основних питань технологічності конструкцій РЕА і питань підвищення надійності технологічних процесів виготовлення з одночасним підвищенням точності теоретичних розрахунків [1].

Аналіз конструкторських особливостей сучасних РЕА показує, що розв'язання задач забезпечення вологозахисту і стійкості при змінах температури навколишнього середовища призвело до використання нових матеріалів з недостатньо вивченими властивостями, до з'єднання різнорідних матеріалів. Проте роботи з проектування РЕА часто ведуться в основному лише у чисто радіотехнічному (схемному) напрямі, без необхідних розрахунків на міцність. Без вимірювання механічних напружень і оцінювання напруженого стану конструкцій в цілому та їх окремих елементів. Між тим сучасні вимоги і майбутнє радіоелектроніки, а також області її використання, висувають поряд з чисто радіотехнічними задачами проблему забезпечення механічної міцності і надійності [1].

При експлуатації компоненти і функціональні вузли можуть працювати за температури від -65 до $+250^{\circ}\text{C}$, з вібраційними частотами від 1 до 5000 Гц, при прискореннях до $40g$, піддаватись ударам з прискоренням до $120 g$, відносна вологість може змінюватись від 5 до 100%, атмосферний тиск – у межах від $6,6 \cdot 10^{-4}$ - 10^5 Па, фонове випромінення (проникальна радіація і гамма-випромінення) може досягати 10^{10} рад/с. В деяких випадках ці впливи можуть бути ще більш жорсткими [2].

1.2 Основні міцнісні параметри елементів РЕА

Під міцністю розуміють здатність апаратури витримати рівноваги вплив, не руйнуючись і продовжувати функціонувати після зняття обурюють навантажень. Технічні вимоги на розробку задаються стандартом, в якому ЕС розкваліфіковані по групам умов експлуатації. Так ДСТУ визначає наступні групи апаратури: наземна стаціонарна (в опалюваних і неопалюваних приміщеннях); наземна мобільна (колісного, гусеничного ходу); переносна (призначена для експлуатації на відкритому повітрі, в руках оператора, вона повинна бути брзко- і вологозахищеною); корабельна (суднова) - може бути на верхній палубі і всередині кают; бортова (літакова, вертолітна) [3].

Апаратура рухомих об'єктів піддається ударам і вібраціям. Вібрації характеризуються і задаються частотою і амплітудою. Автомобільна апаратура піддається впливу вібрацій на частотах f від 10 до 70 Гц, літакова – на частотах від 3 до 2000 Гц. Більш зручною для оцінки впливу вібрації є величина прискорення, або перевантаження I , що вимірюється в одиницях g . При вібраціях перевантаження можна розрахувати через переміщення за формулою:

$$I = \omega^2 A / 9800,$$

де I – перевантаження в одиницях прискорення вільного падіння; A – амплітуда віброперемещення, м; $\omega=2\pi f$ – кутова частота, рад/с. Вібрації, удари небезпечні для елементів конструкції тим, що виникають перевантаження на елементи конструкції. При цьому сили, що діють на елементи, розраховуються за формулою: $F=M \cdot I$, де M – маса елементів. Залежно від умов експлуатації та особливостей конструкції захисту від механічних впливів можуть піддаватися як радіоелектронні комплекси, так і окремі їх блоки, осередки і елементи. Для того щоб проектувана апаратура була вібро- і удароміцною необхідні наступні передумови: при проектуванні необхідно забезпечити мінімальну масу елементів конструкції; деякі елементи конструкції можуть піддаватися деформації розтягування-стиснення, величина якої може виявитися неприпустимо великий. Наприклад, стрижень піддається деформації

$$\Delta X = F \cdot l / E \cdot S,$$

де E - модуль пружності, Па; S – площа поперечного перерізу стержня, м²; l – довжина стержня, м. Для вібро- і удароміцності таких елементів рекомендується зменшувати довжину елемента, збільшувати міцність $[\sigma]$ і жорсткість E матеріалу. Краще вибирати такі матеріали, у яких велика жорсткість E при малій питомій масі [3].

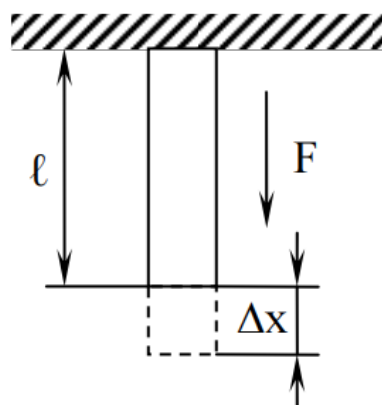


Рис. 1.1 - Деформація розтягу-стиску стержня

Деякі елементи конструкції зазнають деформації вигину. Так балка постійного перерізу, виконана з однорідного ізотропного матеріалу при додатку сили F буде деформуватися на величину

$$\Delta X = F \cdot l^3 / b \cdot E \cdot I,$$

де I - момент інерції перерізу m^4 ; b - коефіцієнт, що залежить від точки прикладання сили. Для жорсткості і міцності подібних елементів рекомендується зменшувати відстань між точками кріплення елементів або пропонувати додаткові точки кріплення. Наприклад, кріплення плати не тільки по периметру, але і в центрі. Для подібних елементів збільшують момент інерції перерізу. для квадратів $I = a^4 / 12$ (a – сторона квадрата). Для прямокутників $I = a \cdot h^3 / 12$ (a – сторона основи, h - висота). Можна бачити, що для жорсткості подібних елементів слід збільшувати, перш за все, товщину h [3].

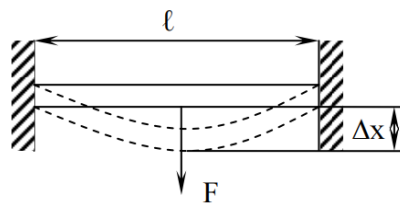


Рис. 1.2 - Деформація згину

Наприклад, збільшувати товщину плати до значень: 0,8; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 – стандартна товщина фольгованого склотекстоліта. Рекомендується при одній і тій же площі перетину збільшувати момент інерції перерізу не за рахунок розміру h , а за допомогою відбортовки, вичавлювання на площині листових несучих елементів. Момент інерції I в перерізі складної конфігурації можна знайти через моменти інерції елементарних перетинів I_i [3, 4].

1.3 Огляд методів і засобів підвищення міцності і герметичності електронної апаратури, що герметизується компаундами

Однією з основних завдань підвищення надійності радіоапаратури є захист її від впливу зовнішнього середовища. Першорядне значення має захист радіоапаратури від шкідливого впливу вологи. До числа найбільш відомих і поширених способів захисту відноситься просочення деталей різними воскоподібними речовинами (парафіном; церезином), а також лаками, природними і штучними смолами і всілякими компаундами.

Поверхні деталей можна захищати від вологи, покриваючи їх шаром спеціальних лаків, емалей або компаундів, які повинні мати гарну адгезію (прилипання) до захищеного матеріалу, щоб утворювалася еластична і непрозора плівка.

Вологозахисні покриття підвищують поверхневий опір деталей і цей факт необхідно враховувати при конструюванні телекомікаційної апаратури.

Однак як просочення, так і захист за допомогою покривних шарів не можуть повністю виключити проникнення вологи. Просочення лише уповільнює процес поглинання вологи. Це пояснюється тим, що молекули просочувальних матеріалів володіють великими розмірами і можуть заповнити, в кращому випадку, мікропори речовини, яка просочується. Таким чином, для проникнення вологи всередину речовини залишаються вільними субмікроскопічні пори, які є навіть у просочувальних матеріалах. Волога проникає через субмікроскопічні пори, оскільки молекули води є дуже малими. Крім того, волога проникає особливо легко через нещільності на границі дотику різних матеріалів. При зміні температури через ці нещільності, що виникають через різниці температурних коефіцієнтів розширення різних матеріалів, волога потрапляє всередину просоченого електронного виробу в значній кількості.

Найбільш надійним засобом захисту радіоапаратури від дії вологи є герметизація. Сутність герметизації полягає в ізоляції окремих радіодеталей, вузлів або радіоапаратури в цілому від навколишнього середовища за допомогою вологих і повітронепроникних оболонок - герметичних кожухів.

Просочення. Процес заповнення лаками, смолами або компаундами мікропор і мікроканалів, макропор і макроканалов діелектриків, а також зазорів між витками обмоток називають просоченням. Просоченню піддають багато деталей і вузлів радіоапаратури, виготовленої з волокнистих електроізоляційних матеріалів, які є за своєю структурою пористими і гігроскопічними (поглинають вологу). До числа таких виробів РЕА відносяться каркаси котушок, монтажні плати, планки та колодки, намотувальні вироби і тощо.

Процес просочення складається з декількох операцій:

- попередньої сушки - видалення вологи з повітряних прошарків, каналів і пор виробу;
- просочення - заповнення просочувальним матеріалом місць, раніше зайнятих вологою і повітрям;
- сушки просочених виробів - видалення розчинників з просоченого складу і його затвердіння;
- лакування або обволакування - запобігання поверхні виробу від проникнення вологи, кислот, лугів, масла, а також від скупчення на виробі пилу і бруду;
- сушки після лакування - видалення розчинників і затвердіння огортального складу речовин.

Найбільш ефективним способом захисту радіоапаратури від впливу кліматичних умов і підвищення її надійності є обгортання виводів деталей, вузлів і окремих приладів в спеціальні кожухи і оболонки з металу, кераміки

або скла. Вибір матеріалу конструкції герметичного кожуха або оболонки визначається призначенням і терміном служби апаратури.

Вартість герметичних кожухів і оболонок з перерахованих вище матеріалів є досить високою, тому в окремих випадках, що допускають згідно з технічними умовами обмежений термін захисту або неповну герметизацію, застосовують більш дешеві і прості корпуси з органічних матеріалів.

Металеві корпуси виготовляють різними способами: штампуванням-втяжкою, ударним видавлюванням, зварюванням або паянням штампованих з листового матеріалу заготовок і литтям.

Електричні високочастотні і високовольтні виводи до апаратури конструюють через прохідні ізолятори. Низькочастотні і низьковольтні кола окремих герметичних блоків з'єднують за допомогою герметизованих штепсельних роз'ємів.

Основними елементами конструкції прохідних скляних ізоляторів є трубка і фланець, впаяні в ізолятор, виконаний зі скла марки ЗС-5 або ЗС-8 з температурним коефіцієнтом лінійного розширення (ТКЛР), рівним $(4,5 - 4,8) \cdot 10^{-6}$. Таким же температурним коефіцієнтом лінійного розширення характеризується матеріал, з якого виготовляють трубки і фланці. Зазвичай застосовують сплав на залізо-нікелевої основі.

Недолік скляних ізоляторів - висока чутливість до різкої зміни температури, при цьому в ізоляторі з'являються тріщини, порушується герметичність.

Більш надійними є склокерамічні і керамічні ізолятори. У склокерамічних ізоляторах між фланцем і склом є керамічна втулка, яка робить його менш чутливим до різких змін температури.

Керамічні ізолятори мають наскрізний отвір для протягування виведення, металізовану торцеву поверхню для пайки і герметичне

закладення виведення і кільцеву поверхню по зовнішньому периметру для пайки до корпусу.

Герметичні з'єднання окремих деталей кожухів (кришок, корпусів і ізоляторів) можуть бути отримані різними способами, що відрізняються один від одного не тільки технікою виконання, але і надійністю герметизації, теплостійкістю, механічною міцністю.

Найбільш поширеним способом є пайка швів і ізоляторів легкоплавкими припоями. При виконанні паяних герметичних з'єднань необхідно застосовувати припій з малим температурним інтервалом кристалізації. Найбільш повно цим вимогам відповідає евтектичний олов'яно-свинцевий припій ПОС-61.

Для пайки швів вручну зазвичай застосовують потужні паяльники молоткастого типу з масивним наконечником. З метою скорочення часу пайки рекомендується з'єднувальні деталі попередньо підігрівати до температури 130-150° С.

Пайку скляних прохідних ізоляторів в дрібносерійне виробництво виконують електричними паяльниками зі спеціальними трубчастими наконечниками. При роботі необхідно нагрівати паяльником не ізолятор, а кришку або корпус, в які його впаївають. В умовах великосерійного і масового виробництва пайку прохідних ізоляторів здійснюють в конвеєрних печах.

Для уникнення розтріскування скляних ізоляторів кришки охолоджують. Кришки до корпусу можна припаювати також струмами високої частоти. Паяні з'єднання забезпечують надійну герметизацію при зміні температури в межах від - 40 до + 85° С.

Більш широкий температурний інтервал герметизації забезпечується з'єднанням деталей кожуха електроконтактним або дуговим зварюванням.

У низці випадків герметизацію з'єднань окремих деталей кожухів, виготовлених з міді, алюмінію, нікелю та деяких інших металів, здійснюють методом так званої холодної зварювання. Цей метод не вимагає нагріву і полягає в пластичній деформації металу деталей, що з'єднуються під впливом тиску, створюваного за допомогою спеціального штампа, робочі частини якого утворюють замкнутий контур. Зона зіткнення поверхонь деталей, що з'єднуються, перетворюється в монолітний сплав. Отримане в результаті холодної зварювання з'єднання має високу механічну міцність і герметичність в діапазоні температур від - 80 до + 180° С. Процес холодної зварювання, що триває частки секунди, забезпечує високу продуктивність.

Ефективним також способом з'єднання окремих конструктивних елементів кожухів є метод закачування. Перевагами його є висока надійність герметизації і механічна міцність з'єднань, крім того, відпадає необхідність застосовувати припої і флюси. Герметичності з'єднань окремих елементів литих кожухів домагаються за допомогою ущільнювальних прокладок з вакуумщільної гуми.

Контролюють якість герметизації, занурюючи герметизовані вироби в мильну воду, підігріту до 70 - 80° С. Всю установку накривають скляним ковпаком і за допомогою вакуум-насоса створюють розрідження із залишковим тиском близько 40-50 мм рт.ст. Одночасний вплив надлишкового тиску всередині корпусу (підігріта вода) і вакууму зовні дозволяє виявити порушення герметизації: виділяються бульбашки газу. Цей метод можна застосовувати для контролю невеликих виробів, внутрішній простір кожуха яких не заповнено заливальними матеріалами. Герметизовані вироби, заповнені рідкими маслами, перевіряють на герметичність в вакуумі з розрідженням до 1 - 3 мм рт. ст. при нагріванні до 70 - 80° С. Порушення герметичності з'єднань дізнаються по масляним плямам, що з'являтимуться на поверхні кожуха.

Герметизація окремих деталей і вузлів полегшує їх заміну без порушення герметизації інших елементів, але призводить до збільшення ваги і підвищення вартості апаратури. Герметизація блоку в загальному кожусі спрощує конструкцію, знижує її вартість, але одночасно виключається можливість доступу до окремих елементів і їх заміна без порушення герметизації.

Усередині кожуха можна створити в порівнянні з атмосферним тиском підвищений або понижений тиск. Якщо необхідно поліпшити умови теплопередачі, вільний простір кожуха заповнюють воднем або гелієм, які мають високу теплопровідність.

На сьогоднішній день для багатьох виробників електроніки важливим є питання якості заливки високовольтних джерел живлення. Для заливки високовольтних джерел живлення використовуються компаунди. Компаунди - це наповнені або ненаповнені полімерні матеріали, призначені для заливки або просочення елементів і вузлів електроапаратури та радіоапаратури. Залежно від типу апаратури компаунди виконують різні функції - сприймають механічні навантаження, відіграють роль діелектрика, об'єднують елементи конструкції в одне ціле, захищають конструкції від вологи тощо [5].

При тривалому впливі відносної вологості питомий опір компаунда зменшується на кілька порядків і становить для компаунда, що твердне під тиском, величину, в 50 разів меншу, ніж для компаунда, що твердне при нормальному тиску. Тангенс кута діелектричних втрат компаунда, що твердне під тиском, в 1.5 рази підвищується, а тверднення при нормальному тиску не змінюється. Діелектрична проникність і електрична міцність компаунда є незмінними і від режиму затвердіння не залежать.

1.4 Огляд методів оцінювання міцності герметизувальних систем

При монтажі і ремонті електронної апаратури застосовують епоксидні компаунди марок К-176, УП-5-199, УП-5-199-1, а також компаунд Е-2200 виробництва Чеської Республіки.

Ці компаунди застосовують тільки з введеними в них отверджувачами. Після введення в компаунди отверджувача вся ця маса переходить з рідкого у твердий неплавкий і нерозчинний стан. Для забезпечення необхідної еластичності або підвищення ударної в'язкості в компаунди вводять пластифікатори: совол, діоктилфіталат, поліфірну смолу марки МГФ-9 і стирол.

Для зменшення коефіцієнта лінійного теплового розширення, зниження саморозігріву при затвердінні, з метою зменшення усадки, поліпшення теплопровідності і механічних характеристик компаунда в цілому, зниження горючості і вартості в компаунди вводять наповнювачі.

Поряд з отверджувачами (наповнювачами) при монтажі та ремонті застосовують парафін і розм'якчувач гуми.

Парафін застосовують як заливний склад для з'єднувальних муфт кабелів з гумовою ізоляцією, а також для визначення відсутності вологи в ізоляції кабелю. Парафін безбарвний, без запаху, злегка жирний на дотик матеріал, з температурою плавлення 45...54°C і електричною міцністю при 20 ° - 20...30 кВ/мм.

Епоксидні компаунди мають високі електроізоляційні властивості і використовуються широко у високовольтній апаратурі. За деякими даними, до 12% усіх епоксидних смол споживається у електротехнічній і радіопромисловості. Визначальними критеріями властивостей епоксидних компаундів щодо їх застосування у електронній апаратурі є їх електротехнічні властивості.

Проблемі механічної надійності, міцності і герметичності елементів РЕА присвячено чимало наукових робіт [6]. Так, автори роботи [7] наводяться результати досліджень високовольтних резисторів з покриттям епоксидним герметиком, що застосовуються у імпульсних системах живлення, таких як електроприводи, зокрема у електричних автомобілях. У роботі [8] 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 [10-14], 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 [15]. 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 поширеним методом дослідження взаємодії герметизувальних матеріалів з матеріалами герметизованих виробів є консольний, описаний в роботі [16]. Недолік методу полягає в тому, що про взаємодію матеріалів судять без урахування багатьох реальних факторів, що існують в РЕА.

У багатьох випадках оцінювання міцності герметика зводиться до оцінювання полімерного матеріалу за його термостійкістю. Зазвичай для цієї мети використовуються моделі, що представляють собою металевий стрижень прямокутного або шестигранного перетину, що встановлюється по осі циліндричної форми, що заливається компаундом. У деяких випадках застосовуються круглі стрижні з лопатками, П-подібні скоби тощо. [17, 18].

У роботах [18-21] наводиться інший метод оцінювання матеріалу за допомогою спеціального приладу, однак отримані результати не можуть бути

повністю перенесені на реальні конструкції РЕА, оскільки отримані без врахування впливу близько розташованих в них елементів, нерівномірності товщини герметизувального матеріалу, близькості стінок, висновків, різного роду включень тощо.

В роботі [22.] представлені математична модель і формули, розроблені для проектних розрахунків, які застосовуються до герметичним електронним блокам і дозволяють оцінити міцність пасивних електронних компонентів, що мають форму обертання (конденсатори, резистори, діоди, висновки тощо). Розрахунок напружень проведений для матеріалів резистора і компаунда в інтервалі температур (від -60 до $+70$ °С) по радіусу резистора і компаунда.

У роботі [23] продемонстровані методи випробувань і вибору композиційних керамік-компаундов на основі розв'язання обернених задач механіки. Запропоновано метод визначення фізико-механічних характеристик з'єднання. Ідея методу полягає в тому, що досліджуваний матеріал пов'язаний з іншими матеріалами, характеристики яких добре відомі і відрізняються від характеристик матеріалу. У запропонованій розрахунковій моделі бажані фізико-механічні властивості слід вважати невідомими. Значення параметрів можна точно виміряти експериментальними методами в процесі експлуатації виробу. Запропоновано характеристики досліджуваних матеріалів і геометричні розміри пропонованих конструкцій. Пропонується рішення задачі оптимізації допусків фізико-механічних характеристик матеріалів.

У роботі [24] наведені результати досліджень термо- і фотоотверждаємих силіконові з'єднання, які мають різні фізичні стани в отвержденному стані, починаючи від гелевого і еластомірного стану (з'єднання, герметики і клеї марки SIEL) до склоподібного стану (з'єднання і клеї Марка STYK). Діапазон робочих температур розроблених матеріалів від -90 до $+350$ °С. Показано, що розроблені компаунди й герметики володіють хорошими механічними і діелектричними властивостями, високою жаро- і морозостійкістю, оптичної і хімічної чистотою, біологічно інертні. Склади бувають дво- і однокомпонентні.

Автори роботи [25] наводяться результати досліджень компаундів, які можуть бути застосовані у сучасній електронній техніці. Описано властивості нового герметизуючого складу з високою термостійкістю (до 250° С) і діелектричними характеристиками і зі зниженою щільністю. Як об'єкти дослідження використані герметики на основі низькомолекулярного діметілсілоксанового каучуку СКТН-1 і олігодіметілсілоксанового каучуку (ОДМС) з кінцевими гідроксильними групами. Як наповнювачі використовуються ценосфер, що представляють собою частина атмосферних розрядів ТЕС, що працюють на твердому паливі. Описано технологію виробництва герметика і його властивості. Наведено результати вимірювання міцності зчеплення розробленого герметика з різними підкладками. Встановлено, що найвищі значення адгезійної міцності отримані для каучуків, а найнижчі - для підкладок з алюмінієвих сплавів.

Отже, проблемам міцності і герметичності виробів силової електроніки присвячено достатньо багато робіт [26-35], але в них майже не розглядаються питання міцності контакту елемент-герметик, не враховується нестабільність фізико-механічних характеристик матеріалів і не враховуються вплив температури і зовнішній тиск. Це пов'язано, очевидно, з тим, що традиційно проектування радіо- і телекомунікаційної апаратури здійснюється інженерами з позицій схемної, електротехнічної і електронної надійності. При цьому звертають увагу на міцність паяних з'єднань і майже не аналізується і не досліджується питання впливу зовнішніх факторів (удари, вібрації, статичне навантаження, динамічне навантаження, теплова дія, дія від атмосферного тиску).

Лише у деяких роботах автори торкаються питання впливу вібраційних і ударних навантажень на електронну апаратуру [36-37], а також впливу температури на міцнісну надійність [38-44]

Висновки до першого розділу. Постановка задач дослідження

Проведений аналіз проблеми міцності і герметичності сучасних РЕА, а також шляхів її вирішення на етапі проектування, дало змогу сформулювати невирішені задачі досліджень.

1. Розробити математичну модель для розрахунку контактного тиску у металоскляних конструкціях деталей РЕА, що мають форму тіла обертання для оцінювання міцність конструкції за різних умов впливу зовнішніх і внутрішніх контактних тисків.

2. Розробити математичну модель, що описує зміни перепаду температури по радіусу елемента РЕА з вісесиметричною формою при довільних законах розподілу температури по радіусу виробу.

3. Удосконалити математичну модель, що описує контактні тиски і напруження, застосувавши схему тришарових циліндрів, при одночасній дії тиску і температури.

4. Розробити методику визначення допустимого розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів, що використовуються при виготовленні РЕА.

5. Розробити методику визначення температурних напружень у РЕА при довільних законах розподілу температури.

6. Розробити методику визначення закону розподілу температури для круглої скляної пластини при склоспаюванні на індукційних установках,

7. Розробити методику визначення сумарних залишкових напружень в вузлах елементів РЕА

2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕА

Об'єктами дослідження цього розділу є різноманітні радіоелектронні елементи і компоненти: діоди, транзистори, конденсатори, фотодатчики, а також вузли гермовиводів, вікончаті вузли фоторезисторів та ін. (рис. 2.1).

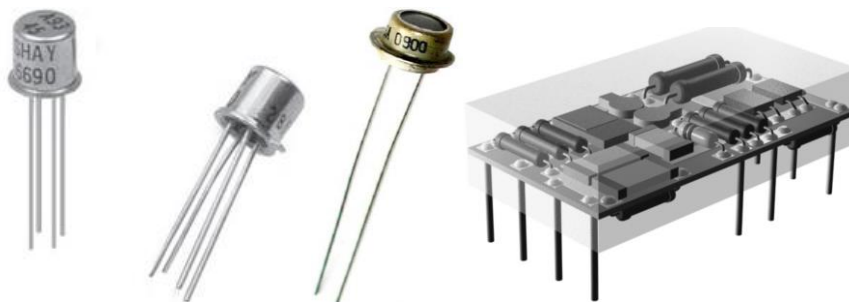


Рис. 2.1 – Об'єкти досліджень

Ці об'єкти об'єднані схожістю своєї форми – циліндра. На рис. 2.1 показані поздовжні і поперечні перерізи деяких з типових радіоелементів: вікончатий вузол, гермовиводи типу бусинкових спаїв, діоди, герметизовані компаундом. Тут і надалі розглянуті типові вузли будемо геометрично розглядати як тіла обертання, оточені з однієї або обох сторін шарами інших матеріалів.

Для утворення розглянутого з'єднання деталі спочатку розігрівають до температури плавлення однієї з них. Характерно, що при цьому відбувається вільне розширення деталей, а вже потім – їх з'єднання. У процесі охолодження внаслідок різниці $\Phi M X$ α , μ , E , тобто КЛТР, коефіцієнта Пуассона і модуля пружності, деталі вже не мають змоги повернутися до вихідного стану і на їх границі виникає контактний тиск. Внаслідок контактного тиску в самих сполучних деталях виникають внутрішні залишкові напруження. Слід зазначити, що фізико-хімічні процеси, що відбуваються у вузькому контактному шарі на границі з'єднання також є

причиною виникнення внутрішніх напружень. У описаних далі дослідженнях не ставилася мета вивчення цих процесів. Ці процеси є складними і мало вивченими, тому досі залишається багато невирішених проблем.

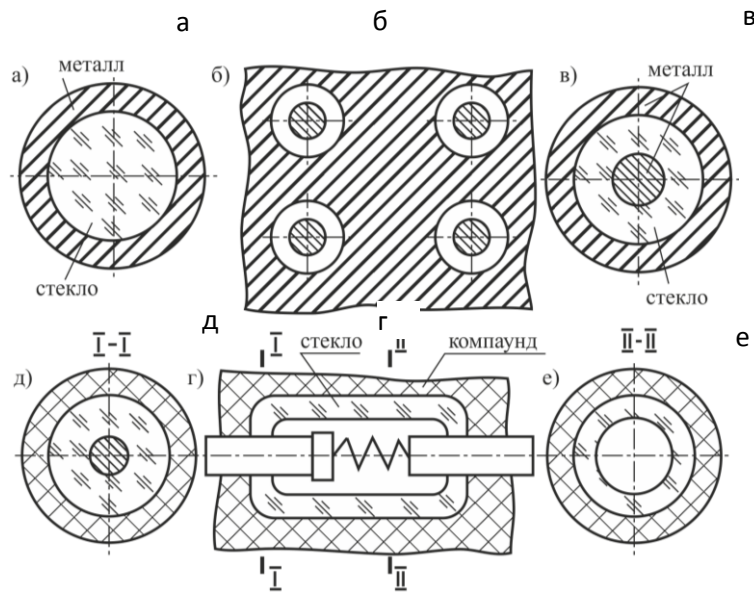


Рис. 2.2 - Поздовжні і поперечні перерізи типових вузлів мікроприладів РЕА:

- а) вікончатий вузол;
- б), в) вузли гермовиводів через бусинкові склоспаї;
- г) діод;
- д), е) переріз діода в виробі, яка герметизується компаундом

Тому, вважаючи за [45], що крайові ефекти подвоюють напруження, в подальшому в роботі будуть розглядатися лише напруження, що виникають внаслідок різниці α , μ , E , а врахування крайових ефектів позначиться на виборі значення коефіцієнта запасу міцності. Напруження, що виникають у вузлах і деталях мікроприладів, залежать не тільки від зазначених факторів і перепадів температур, а й від нерівномірності розподілу температури по деталях в процесі охолодження, під час термовипробувань, експлуатації та інших факторів. До цих технологічних напружень додаються експлуатаційні

напруження, зокрема, напруження від тиску навколишнього середовища, від деформації плат, корпусів, опор, на яких змонтовані об'єкти дослідження, і інших чинників.

Розрахунок або вимір цих сумарних статичних напружень сам по собі ще нічого не дасть, бо отримані значення необхідно порівняти з граничними чи допустимими напруженнями, які завжди мають статистичний характер і залежать від якості виготовлення виробів або матеріалів, що поставляються, зокрема, від мікрodefektів матеріалів.

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 defektів, що мають статистичний характер. Щоб оцінити міцність виробів, після їх виготовлення і проведення найбільш типових для даної категорії виробів випробувань необхідно розрахувати, перш за все, температурні контактні напруження з урахуванням тиску навколишнього середовища і порівняти їх з граничними.

Послідовно розглянемо відшукання цих статичних напружень для типових вузлів і елементів мікроприладів з метою отримання або удосконалення інженерних методик проектування виробів РЕА.

2.1 Контактні напруження при впливі зовнішніх і внутрішніх контактних тисків

Об'єктом, що розглядається у цьому підрозділі, є скляний електронний елемент, яка має форму циліндра. Елемент конструктивно припаяний до металевої частини, що охоплює скляну частину. Для наступного аналізу напружено-деформованого стану припустимо, що:

- напруженнями, що виникають внаслідок зміни розмірів при склуванні, тобто усадки; нехтують;
- для конструкції виконується закон Гука;

- для конструкції виконується гіпотеза плоских перерізів.

Надалі буде показано, що така схематизація може бути застосована для розглянутих об'єктів дослідження.

Розглянемо (див. рис. 2.2, б, в) переріз вузла виводу через бусинковий склоспай. Нехай циліндри навантажені внутрішнім і зовнішнім тиском. Отже, нехай внутрішній контактний тиск дорівнює P_1 , а зовнішній контактний тиск - P_2 . За r_1 і r_2 позначимо відповідно внутрішній і зовнішній радіуси зовнішнього циліндра. Такий зовнішній металевий циліндр показаний на рис. 2.3. Хоча природа утворення сил в кожному випадку індивідуальна, рівняння рівноваги вісесиметричного тіла будуть однакові для всіх випадків, в тому числі і для розглянутих тут випадків з'єднання різномірних матеріалів в типових вузлах елементів РЕА. За умови точності розрахунків 5-6%, циліндр з відношенням $R_2 / r_2 > 4$ можна розглядати таким, що має нескінченно товсту стінку. Слід брати до уваги, що величина контактної тиску p асимптотично зростає і наближається до деякого значення. Надалі припускаємо, що при інженерних розрахунках можна вважати розглянуту скляну конструкцію циліндром з нескінченно великим радіусом.

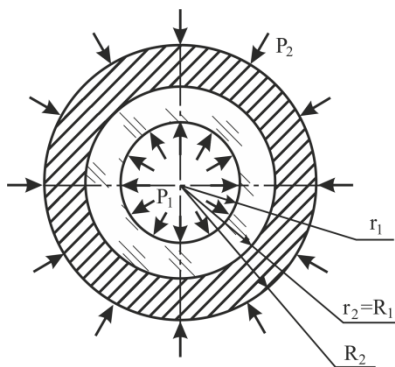


Рис. 2.3 - Розрахункова схема типового вузла РЕА

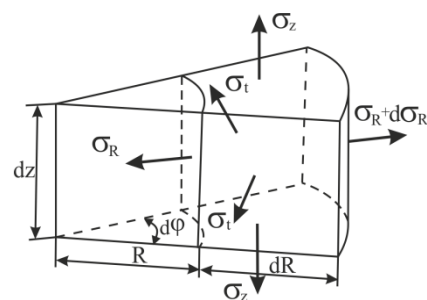


Рис. 2.4 - Рівновага нескінченно малого елемента

Далі аналізується зовнішній циліндр. Навантажимо його внутрішнім контактним тиском p і зовнішнім тиском P_2 . Аналіз рівноважного стану

нескінченно малого елемента циліндра представлений на рис. 2.4. Такий елемент можна розглядати як сегмент, утворений двома поперечними площинами з відстанню dz між ними, двома осьовими площинами з кутом $d\varphi$ між ними і двома циліндрами з радіусами R і $(R + dR)$ [46]. Такий аналіз показує, що розрахункові формули щодо визначення контактної тиску приводять до відомих формул Ляме-Гадоліна:

- для металевого циліндра, який покриває скляну конструкцію ззовні

$$U_M = E_M (1 - 2\mu_M) \cdot (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \left((R_1^2 p - R_2^2 P_2) R + \frac{1 + \mu_M}{E_M} \cdot (R_1^2 R_2^2 (p - P_2)) \frac{1}{R} \right), \quad (2.1)$$

$$\sigma_R = (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \left((R_1^2 q - R_2^2 P_2) - (R_1^2 R_2^2 (q - P_2)) R^{-2} \right), \quad (2.2)$$

$$\sigma_t = (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \left((R_1^2 q - R_2^2 P_2) + (R_1^2 R_2^2 (q - P_2)) R^{-2} \right), \quad (2.3)$$

$$\sigma_z = (R_2^2 - R_1^2)^{-1} (q R_1^2 - P_2 R_2^2); \quad (2.4)$$

- для скляного циліндра, який розташовується всередині металевого циліндра

$$U_c = (r_2^2 - r_1^2)^{-1} \left(\frac{1 - 2\mu_c}{E_c} \cdot (r_1^2 P_1 - r_2^2 p) r + \frac{1 + \mu_c}{E_c} \cdot (r_1^2 r_2^2 (P_1 - p)) \cdot \frac{1}{r} \right), \quad (2.5)$$

$$\sigma_r = (r_2^2 - r_1^2)^{-1} \left((r_1^2 P_1 - r_2^2 p) - (r_1^2 r_2^2 (P_1 - p)) \cdot r^{-1} \right), \quad (2.6)$$

$$\sigma_t = (r_2^2 - r_1^2)^{-1} \left((r_1^2 P_1 - r_2^2 p) + (r_1^2 r_2^2 (P_1 - p)) \cdot r^{-1} \right), \quad (2.7)$$

$$\sigma_z = (r_2^2 - r_1^2)^{-1} (Pr_1^2 - pr_2^2), \quad (2.8)$$

де σ_R – радіальне напруження; σ_t – окружне (тангенціальне) напруження; σ_z – осьове напруження; U_M – радіальне переміщення зовнішнього металевого 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 металеві навколишньої частини:

$$U_M = (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \left(\frac{1 - \mu_M}{E_M} \cdot (R_1^2 p \cdot R_2) + \frac{1 + \mu_M}{E_M} \cdot (R_1^2 R_2^2 p) \cdot R^{-1} \right), \quad (2.9)$$

$$\sigma_R = (R_2^2 - R_1^2)^{-1} (R_1^2 p - R_1^2 R_2^2 p \cdot R^{-2}), \quad (2.10)$$

$$\sigma_t = (R_2^2 - R_1^2)^{-1} (R_1^2 p + (R_1^2 R_2^2 p) \cdot R^{-2}). \quad (2.11)$$

Для частини конструкції, виготовленої зі скла, залежності (2.5) - (2.7) залишаються без зміни. При цьому для зовнішнього циліндра найбільшими значеннями σ_t і σ_R будуть у внутрішній поверхні при $R = R_1$:

$$\sigma_R = -p, \quad (2.12)$$

$$\sigma_t = p(R_1^2 + R_2^2)(R_2^2 - R_1^2)^{-1}, \quad (2.13)$$

$$U_M = E_M^{-1} R_1 p \cdot \left((R_2^2 - R_1^2)^{-1} (R_2^2 + R_1^2) + \mu_M \right). \quad (2.14)$$

У зовнішній поверхні зовнішнього циліндра, при:

$$\sigma_R = 0, \quad (2.15)$$

$$\sigma_t = 2R_1^2 p (R_2^2 - R_1^2)^{-1}, \quad (2.16)$$

$$U_M = (R_2 \cdot R_1) (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \cdot p E_m^{-1} \quad (2.17)$$

Аналізуючи внутрішній циліндр, маємо $P_2 = 0$ на внутрішній поверхні ($r = r_1$):

$$U_c = (r_1^3 P_1 (1 - \mu_c) - 2r_1 r_2^2 p + r_1 r_2^2 P_1 (1 + \mu_c)) E_c^{-1} (r_2^2 - r_1^2)^{-1}, \quad (2.18)$$

$$\sigma_r = -P_1, \quad (2.19)$$

$$\sigma_t = (P_1 (r_2^2 - r_1^2) - 2r_2^2 p) (r_2^2 - r_1^2)^{-1}. \quad (2.20)$$

При $r = r_2$ формули (2.5)–(2.7) набувають вигляду:

$$U_c = (2r_1^2 r_2 P_1 - r_2^3 p (1 - \mu_c) - 2r_2 r_1^2 p (1 + \mu_c)) E_c^{-1} (r_2^2 - r_1^2)^{-1}, \quad (2.21)$$

$$\sigma_r = -p, \quad (2.22)$$

$$\sigma_t = (2r_1^2 P_1 - p (r_2^2 - r_1^2)) (r_2^2 - r_1^2)^{-1}; \quad (2.23)$$

б) нехай розглянутий циліндр піддається навантаженню лише 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 металевої навколишньої частини:

$$U_M = (R_2^2 - R_1^2)^{-1} E_M^{-1} \left((1 - \mu_M) \cdot (R_1^2 p \cdot R_2^2 P_2) R + (1 + \mu_M) \cdot (R_1^2 R_2^2 (p - P_2)) \cdot \frac{1}{R} \right),$$

$$\sigma_R = (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \left((R_1^2 p - R_2^2 P_2) - (R_1^2 R_2^2 (p - P_2)) \cdot R^{-2} \right),$$

$$\sigma_t = (R_2^2 - R_1^2) \left((R_1^2 p - R_2^2 P_2) + (R_1^2 R_2^2 (p - P_2)) \cdot R^{-2} \right),$$

тобто отримаємо вирази (2.1) - (2.3). Вважаючи, що $R = R_1$, а згодом $R = R_2$, відшукуємо U_M , σ_R , σ_t на внутрішній і зовнішній поверхнях охопленого циліндра ($R = R_1$):

$$U_M = \left[R_1^3 p (1 - \mu_M) - 2R_1 R_2^2 P_2 + R_1 R_2^2 p (1 + \mu_M) \right] E_M^{-1} (R_2^2 - R_1^2)^{-1}, \quad (2.24)$$

$$\sigma_R = -p, \quad (2.25)$$

$$\sigma_t = (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \left(p(R_2^2 + R_1^2) - 2R_2^2 P_2 \right); \quad (2.26)$$

при $R = R_2$

$$U_M = R_2 P_2 E_M^{-1} (1 - \mu_M), \quad (2.27)$$

$$\sigma_R = -P_2, \quad (2.28)$$

$$\sigma_t = (2R_1^2 p - P_2(R_2^2 + R_1^2))(R_2^2 - R_1^2)^{-1}. \quad (2.29)$$

Надалі пропонується проаналізувати за умови $P_1 = 0$ зміну величини для внутрішнього скляного циліндра:

$$U_c = -(r_2^2 - r_1^2)^{-1} \left(\frac{1 - \mu_c}{E_c} \cdot r_2^2 p r - \frac{1 + \mu_c}{E_c} \cdot (r_1^2 r_2^2 p) \cdot r^{-1} \right), \quad (2.30)$$

$$\sigma_r = (r_2^2 - r_1^2)^{-1} (-r_2^2 p + r_1^2 r_2^2 r^{-2} p), \quad (2.31)$$

$$\sigma_t = (r_1^2 - r_2^2)^{-1} (r_2^2 p + r_1^2 r_2^2 p r^{-2}). \quad (2.32)$$

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

$$U_c = 2E_c^{-1} (r_1^2 - r_2^2)^{-1} r_1^2 r_2^2 p \quad (2.33)$$

$$\sigma_r = 0 \quad (2.34)$$

$$\sigma_t = 2r_2^2 p (r_1^2 - r_2^2)^{-1}. \quad (2.35)$$

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

$$U_c = r_2 p E_c^{-1} \left(\mu - (r_2^2 + r_1^2) (r_2^2 - r_1^2)^{-1} \right), \quad (2.36)$$

$$\sigma_r = -p, \quad (2.37)$$

$$\sigma_t = (r_1^2 - r_2^2)^{-1} p (r_2^2 + r_1^2). \quad (2.38)$$

Величина контактного тиску p може бути знайдена з умови спільності деформацій на поверхні розділу «метал-скло». Можна систематизувати що наведені вирази.

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:

- а) для (металічного) циліндра, що охоплює – формули (2.1)–(2.3);
- б) для внутрішнього (скляного) циліндра – формули (2.5)–(2.7).

2. В частинному випадку, коли зовнішній тиск $P_2 = 0$, для визначення переміщень і напружень в будь-якій точці служать вирази (2.9)–(2.11) – для зовнішнього циліндра; (2.5)–(2.7) – для внутрішнього. На внутрішніх поверхнях циліндрів перераховані параметри в цьому випадку визначаються за формулами (2.12)–(2.14) – для зовнішнього циліндра; (2.18)–(2.20) – для внутрішнього. На зовнішніх поверхнях: (2.15)–(2.17) – для зовнішнього циліндра; (2.21)–(2.23) – для внутрішнього.

3. У тому випадку, коли внутрішній тиск $P_1 = 0$, для визначення переміщень і напружень в будь-якій точці циліндра служать вирази за формулами (2.1)–(2.3) – для зовнішнього циліндра; (2.30)–(2.32) – для внутрішнього. На внутрішніх поверхнях циліндрів перераховані параметри визначаються за формулами (2.24)–(2.26) – для зовнішнього циліндра; (2.33)–(2.35) – для внутрішнього. На зовнішніх поверхнях циліндрів для визначення переміщень служать вирази (2.27)–(2.29) – для зовнішнього циліндра; (2.36)–(2.38) – для внутрішнього.

2.2 Контактні напруження при довільних законах розподілу

Перепади атмосферного або гідростатичного тисків, а також контактного тиску є не єдиним фактором, що призводить до розгерметизації і

руйнування елементів РЕА. Вузли та деталі виробів РЕА в процесі їх виготовлення і експлуатації піддаються всіляким температурним впливам, що призводять до виникнення температурних напружень.

Для забезпечення надійної роботи конструкції необхідно ще на етапі проектування врахувати «внесок» цих температурних напружень, що виникають через нерівномірність розподілу температури по радіусу виробу, в загальну суму залишкових напружень, що діють у виробах РЕА.

Розглянемо циліндр (див. рис. 2.2), що знаходиться в температурному полі, симетричному щодо його поздовжньої осі. Будемо вважати, що поле є постійним уздовж цієї осі, справедливим є закон Гука і справедливою є гіпотеза плоских перерізів. Відносні деформації визначимо з узагальненого закону Гука (фізична сторона задачі) з урахуванням нерівномірності розподілу температури:

$$\begin{cases} \varepsilon_z = E^{-1}(\sigma_z - \mu\sigma_R - \mu\sigma_t) + \alpha T(r) = \text{const}; \\ \varepsilon_R = E^{-1}(\sigma_R - \mu\sigma_z - \mu\sigma_t) + \alpha T(r); \\ \varepsilon_t = E^{-1}(\sigma_t - \mu\sigma_R - \mu\sigma_z) + \alpha T(r), \end{cases} \quad (2.39)$$

де $T(r)$ – зміна температури, залежна від радіуса r ; α – коефіцієнт лінійного температурного розширення.

Розв'язуючи рівняння (2.39) щодо напружень і виразивши деформації через переміщення, здійснюючи відповідні перетворення і спрощення, остаточно отримаємо, що:

$$\sigma_R = E_M R^{-2} (1 - \mu_M)^{-1} \left[- \int_{R_1}^R \alpha_M T(R) R dR + (R^2 - R_1^2) (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_M T(R) R dR \right], \quad (2.40)$$

$$\sigma_t = E_M R^{-2} (1 - \mu_M) \left[\int_{R_1}^R \alpha_M T(R) R dR + (R_1^2 + R^2) (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_M T(R) R dR - \alpha_M T(R) \right], \quad (2.41)$$

$$\sigma_z = E_m (1 - \mu_m)^{-1} \left[2(R_2^2 - R_1^2)^{-1} \int_{R_1}^R \alpha_m T(R) R dR - \alpha_m T(R) \right]. \quad (2.42)$$

Аналогічно розмірковуючи, можна отримати відповідні формули для внутрішнього скляного циліндра:

$$\sigma_r = (1 - \mu_c)^{-1} E_c r^{-2} \left[-\int_{r_1}^r \alpha_c T(r) r dr + (r^2 - r_1^2)(r_2^2 - r_1^2)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_m T(r) r dr \right], \quad (2.43)$$

$$\sigma_t = (1 - \mu_c)^{-1} E_c r^{-2} \left[\int_{r_1}^r \alpha_c T(r) r dr + (r_1^2 + r^2)(r_2^2 - r_1^2)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_c T(r) r dr - \alpha_c T(r) \right], \quad (2.44)$$

$$\sigma_z = (1 - \mu_c)^{-1} E_c \left[2(r_2^2 - r_1^2)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_c T(r) r dr - \alpha_c T(r) \right]. \quad (2.45)$$

Вирази для температурних радіальних деформацій для зовнішнього і внутрішнього циліндрів будуть мати такий вигляд:

$$\sigma_R = R^{-1} \left[(1 + \mu_m)(1 - \mu_m)^{-1} \int_{R_1}^R \alpha_m T(R) R dR + (1 - \mu_m)^{-1} (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \left((1 + \mu_m) R_1^2 + R^2 (1 - 3\mu_m) \right) \int_{R_1}^{R_2} \alpha_m T(R) R dR \right], \quad (2.46)$$

$$\sigma_r = r^{-1} \left[(1 + \mu_c)(1 - \mu_c)^{-1} \int_{r_1}^r \alpha_c T(r) r dr + (r_2^2 - r_1^2)^{-1} (1 - \mu_c)^{-1} \left((1 + \mu_c) r_1^2 + r^2 (1 - 3\mu_c) \right) \int_{r_1}^{r_2} \alpha_c T(r) r dr \right]. \quad (2.47)$$

Таким чином, для визначення осьових, радіальних, окружних напружень і радіальних деформацій в деталях і вузлах елементів РЕА, що

мають осесиметричну форму, необхідно знати закон зміни перепаду температури по радіусу виробу. Ці закони можуть бути найрізноманітнішими: статичними, логарифмічними, експоненціальними і так далі. Так, наприклад, ціла сім'я статичних законів може бути описано рівнянням виду:

$$T(R) = (R - R_1)^n (R_2 - R_1)^{-n} (T_{R_2} - T_{R_1}) + T_{R_1}, \quad (2.48)$$

де T_{R_2} – температура на зовнішній поверхні циліндра; T_{R_1} – температура на внутрішній поверхні циліндра; R – чинний радіус; R_1 – внутрішній радіус циліндра, і R_2 – зовнішній радіус циліндра; n – довільний показник ступеня.

У п. 2.4 показаний шлях визначення закону зміни температури по радіусу скляної пластини при операції склоспаювання, яку застосовували на заводі-виробнику фоторезисторів до впровадження рекомендацій, які впливають з цієї роботи.

2.3 Контактні напруження при одночасній дії тиску і температури

В реальних умовах виробу РЕА піддаються одночасній дії тиску і температури. У зв'язку з цим виникає необхідність визначення напружень і контактних тисків в елементах, що зазнають такої дії. Відповідно до принципу незалежності дії сил для скляної частини виробу, враховуючи формули (2.5) і (2.47), отримаємо:

$$U_c = r^{-1} \cdot (1 + \mu_c)(1 - \mu_c)^{-1} \int_{r_1}^r \alpha_c T(r) r dr + r \left[E_c^{-1} (1 - 2\mu_c) \cdot (r_1^2 P_1 - r_2^2 p) (r_2^2 - r_1^2)^{-1} + (1 - 3\mu_c)(1 - \mu_c)^{-1} (r_2^2 - r_1^2)^{-1} \cdot \int_{r_1}^{r_2} \alpha_c T(r) r dr \right] + \\ + r^{-1} \left[(1 + \mu_c) E_c^{-1} \cdot (r_1^2 r_2^2 (p - P_1) (r_1^2 - r_2^2)) + (1 + \mu_c) r_1^2 (r_2^2 - r_1^2)^{-1} (1 - \mu_c)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_c T(r) r dr \right]. \quad (2.49)$$

З урахуванням залежностей (2.1) і (2.46) для металевої частини отримаємо:

$$U_m = R^{-1} \cdot (1 + \mu_m)(1 - \mu_m)^{-1} \int_{R_1}^R \alpha_m T(R) R dR + R \left[\begin{aligned} & (1 - 2\mu_m) E_m^{-1} \cdot (R_1^2 p - R_2^2 P_2) (R_2^2 - R_1^2)^{-1} + \\ & + (R_2^2 - R_1^2)^{-1} (1 - 3\mu_m) (1 - \mu_m)^{-1} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_m T(R) R dR \end{aligned} \right] + \quad (2.50)$$

$$+ R^{-1} \left[\begin{aligned} & (1 + \mu_m) E_m^{-1} (R_2^2 - R_1^2)^{-1} (R_1^2 R_2^2 (p - P_2)) + \\ & + (R_2^2 - R_1^2)^{-1} (1 + \mu_m) (1 - \mu_m)^{-1} R_1^2 \int_{R_1}^{R_2} \alpha_m T(R) R dR \end{aligned} \right].$$

Для визначення величини контактної тиску складаємо умову сумісності деформацій у разі одночасного впливу тиску і температури:

$$U_c = U_m, \quad (2.51)$$

де

$$U_c = U_c^T + U_c^P, \quad (2.52)$$

$$U_m = U_m^T + U_m^P. \quad (2.53)$$

В формулах (2.52) і (2.53) U_c^T і U_m^T – радіальне переміщення скляної і металевої частини виробу під дією перепаду температури; U_c^P і U_m^P – радіальне переміщення скляної і металевої частини елемента під дією перепадів тиску навколишнього середовища. Слід зауважити, що доданки в формулах (2.49), (2.50), (2.52), (2.53), в залежності від знака тиску можуть додаватися або відніматися; тут розглядається екстремальний випадок, коли ці напруження будуть додаватися.

Прирівнюючи вирази (2.52) і (2.53) і вважаючи, що на границі розділу «метал-скло» виконується $r = r_2, R = R_1$, визначимо величину контактного тиску:

$$p = \frac{-2(R_2^2 - R_1^2)^{-1} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_c T(R) R dR + \frac{P_2 R_2^2 (2 - \mu_m)}{E_m (R_2^2 - R_1^2)} + \frac{P_1 r_1^2 (2 - \mu_c)}{E_c (r_2^2 - r_1^2)} + 2(r_2^2 - r_1^2)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_c T(r) r dr}{E_c^{-1} (r_2^2 - r_1^2)^{-1} ((1 - 2\mu_c) r_2^2 + (1 + \mu_c) r_1^2) + E_m^{-1} (R_2^2 - R_1^2)^{-1} ((1 - 2\mu_m) R_1^2 + (1 + \mu_m) R_2^2)}. \quad (2.54)$$

У загальному випадку одночасного впливу на виріб тиску і температури значення радіальних, окружних і осьових напружень для скляної частини елемента згідно (2.43) і (2.6), (2.44) і (2.7), (2.42) і (2.8) визначатимуться за такими формулами:

$$\sigma_r = (r_2^2 - r_1^2)^{-1} (r_1^2 P_1 - r_2^2 p) - (r_2^2 - r_1^2)^{-1} (r_1^2 r_2^2 (P_1 - p)) \cdot r^{-2} + \\ + - r^{-2} E_c (1 - \mu_c)^{-1} \left[\int_{r_1}^r \alpha_c T(r) r dr - (r^2 + r_1^2) (r_2^2 - r_1^2)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_c T(r) r dr \right], \quad (2.55)$$

$$\sigma_t = r_1^2 (r_2^2 - r_1^2)^{-1} \left((P_1 - r_2^2 p) + r_2^2 (P_1 - p) r^{-2} \right) + \\ + E_c (1 - \mu_c) r^{-2} \left[\int_{r_1}^r \alpha_c T(r) r dr + (r_1^2 + r^2) (r_2^2 - r_1^2)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_c T(r) r dr - \alpha_c T(r) \right], \quad (2.56)$$

$$\sigma_z = (P_1 r_1^2 - p r_2^2) (r_2^2 - r_1^2)^{-1} - E_c \left[\alpha_c T(r) - 2 (r_1^2 - r_2^2) \int_{r_1}^{r_2} \alpha_c T(r) r dr \right] (\mu_c - 1). \quad (2.57)$$

Аналогічно можна отримати формули для $\sigma_R, \sigma_t, \sigma_z$ в зовнішньому металевому циліндрі. Для цього відповідно до виразів (2.40) і (2.2), (2.41) і (2.3), а також (2.45) і (2.4) отримаємо:

$$\sigma_R = (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \left[(R_1^2 p - R_2^2 P_2) + R_1^2 R_2^2 (P_2 - p) R^{-2} \right] + E_M R^{-2} (\mu_M - 1)^{-1} \left[\int_{R_1}^R \alpha_M T(R) R dR - (R^2 - R_1^2) (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_M T(R) R dR \right], \quad (2.58)$$

$$\sigma_t = (R_1^2 - R_2^2)^{-1} \left[R_2^2 P_2 - R_1^2 p - R_1^2 R_2^2 (p - P_2) R^{-2} \right] + E_M R^{-2} (1 - \mu_M)^{-1} \left[\int_{R_1}^R \alpha_M T(R) R dR + (R_1^2 + R^2) (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_M T(R) R dR - \alpha_M T(R) \right], \quad (2.59)$$

$$\sigma_z = (P_2 R_2^2 - p R_1^2) (R_1^2 - R_2^2)^{-1} - E_M (\mu_M - 1)^{-1} \left[\alpha_M T(R) - 2 (R_1^2 - R_2^2) \int_{R_1}^{R_2} \alpha_M T(R) R dR \right]. \quad (2.60)$$

Задаючи у виразах (2.55)–(2.60) закони зміни перепадів температури $T(r)$; $T(R)$, можна визначити напруження в будь-якій точці виробу.

Висновки до другого розділу

У розділі отримано нові наукові результати, що можуть бути застосовані для вироблення практичних методик оцінювання міцності радіоелементів і компонентів, які мають форму тіл обертання, і піддаються при виготовленні та експлуатації різноманітним силовим навантаженням:

1. Для металоскляних конструкцій деталей РЕА, що мають форму тіла обертання (фоторезистори та ін.), удосконалено математичну модель визначення контактного тиску (напружень), що дало змогу оцінювати міцність конструкції за різних умов впливу зовнішніх і внутрішніх контактних тисків.

2. Обґрунтовано математичну модель, що описує сім'ю статичних законів зміни перепаду температури по радіусу елементу РЕА, що мають вісесиметричну форму, що дало змогу визначати напруження при довільних законах розподілу температури по радіусу виробу.

3 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ КОМПАУНДОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕА

3.1 Контактний тиск і напруження в елементах РЕА, що приводяться до схеми тришарових циліндрів при одночасній дії тиску і температури

Ще більш загальним випадком є «тришаровий» циліндр, який піддається одночасній дії зовнішнього (P_2) і внутрішнього тиску (P_1), а також перепадам температури. Така розрахункова схема (рис. 2.4) відповідає низці реальних елементів РЕА або їх вузлів. На (рис. 2.2, в, д) показані приклади перерізів елементів, що відповідають цій розрахунковій схемі. В цьому випадку необхідно вміти визначати два контактних тиски: p – на стику внутрішнього і середнього циліндрів і P – контактний тиск на стику середнього та зовнішнього циліндрів.

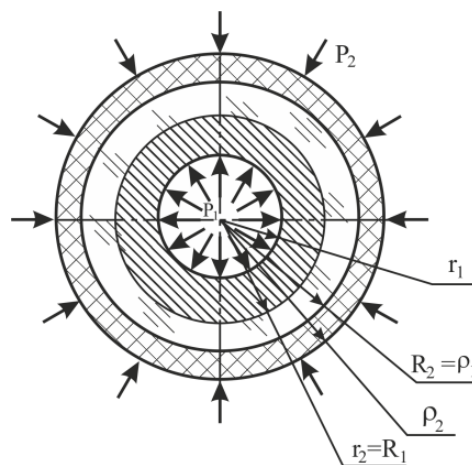


Рис. 3.1 – Перерізи елементів РЕА, що зводяться до схеми «тришарового» циліндра

Будемо вважати, що і в цьому випадку є справедливими прийняті раніше допущення. Розглянемо внутрішній (наприклад, металевий) циліндр і

середній (наприклад, скляний) циліндр. На внутрішній циліндр діє внутрішній тиск P_1 і контактний тиск p , що виникає на стику внутрішнього і середнього циліндрів внаслідок перепадів тиску і температури навколишнього середовища. На середній циліндр діє контактний тиск p . Зовнішнім тиском для нього є контактний тиск P з боку зовнішнього (наприклад, компаундного) циліндра. Аналогічно для пари «середній-зовнішній циліндр» внутрішнім є контактний тиск P , що діє по стику середнього та зовнішнього циліндрів, а зовнішнім - тиск навколишнього середовища P_2 . Відповідно до викладеного можна записати, що:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = \frac{-2(r_1^2 - r_2^2)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_c T(R) R dR - 2(\rho_2^2 - \rho_1^2)^{-1} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \alpha_k T(\rho) \rho d\rho + \frac{p R_1^2 (\mu_c - 2)}{E_c (R_1^2 - R_2^2)} + \frac{P_2 \rho_2^2 (2 - \mu_k)}{E_k (\rho_2^2 - \rho_1^2)}}{E_m^{-1} (r_2^2 - r_1^2)^{-1} [(1 - 2\mu_m) r_2^2 + (1 + \mu_m) r_1^2] + ((1 - 2\mu_c) R_1^2 + (1 + \mu_c) R_2^2) E_c^{-1} (R_2^2 - R_1^2)^{-1}} \\ P = p = \frac{\frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_c T(R) R dR - \frac{2}{\rho_2^2 - \rho_1^2} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \alpha_k T(\rho) \rho d\rho + \frac{p R_1^2 (2 - \mu_c)}{E_c (R_2^2 - R_1^2)} + \frac{P_2 \rho_2^2 (2 - \mu_k)}{E_k (\rho_2^2 - \rho_1^2)}}{(E_c (R_2^2 - R_1^2))^{-1} [(1 - 2\mu_c) R_2^2 + (1 + \mu_c) R_1^2] + E_k^{-1} (\rho_2^2 - \rho_1^2)^{-1} (\mu_k \rho_2^2 - 2\mu_k \rho_1^2 + \rho_2^2 + \rho_1^2)} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Для розв'язання системи (3.1) введемо такі позначення:

$$2(r_2^2 - r_1^2)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_c T(r) r dr = A, \quad r_1^2 (\mu_m - 2) E_m^{-1} (r_1^2 - r_2^2)^{-1} = D;$$

$$\frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_c T(R) R dR = B, \quad \frac{R_2^2 (2 - \mu_c)}{E_c (R_2^2 - R_1^2)} = K;$$

$$\frac{2}{\rho_2^2 - \rho_1^2} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \alpha_k T(\rho) \rho d\rho = C, \quad \frac{R_1^2 (2 - \mu_c)}{E_c (R_2^2 - R_1^2)} = L;$$

$$\frac{\rho_2^2 (2 - \mu_k)}{E_k (\rho_2^2 - \rho_1^2)} = M. \quad (3.2)$$

Нехай знаменник першого рівняння системи (3.1) буде позначений як $Z_{нам_1}$, а знаменник другого рівняння цієї ж системи - $Z_{нам_2}$. Підставляючи прийняті позначення в систему (3.1) і розв'язуючи її щодо p і P , отримаємо:

$$\begin{cases} p = \frac{Z_{нам_2}(A - B + P_1D) + K(B - C + P_2M)}{Z_{нам_2}Z_{нам_1} - KL}, \\ P = \frac{L(A - B + P_1D) + Z_{нам_1}(B - C + P_2M)}{Z_{нам_2}Z_{нам_1} - KL}. \end{cases} \quad (3.3)$$

Позначивши

$$\begin{aligned} A - B + P_1D &= H_1, \\ B - C + P_2M &= H_2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

остаточно отримаємо:

$$\begin{cases} p = \frac{Z_{нам_2}H_1 + KH_2}{Z_{нам_2}Z_{нам_1} - KL}, \\ P = \frac{LH_1 + Z_{нам_1}H_2}{Z_{нам_2}Z_{нам_1} - KL}. \end{cases} \quad (3.5)$$

Використовуючи залежності (2.55)-(2.60), задаючи значення контактних тисків на стиках обох циліндрів, можна записати вирази для визначення шуканих напружень σ_R ; σ_t ; σ_z .

Для внутрішнього металевго циліндра:

$$\begin{aligned} \sigma_r = & (r_2^2 p - r_1^2 P_1)(r_1^2 - r_2^2)^{-1} + (r_1^2 r_2^2 r^{-2}(P_1 - p))(r_1^2 - r_2^2)^{-1} + \\ & + E_m r^{-2} (\mu_m - 1)^{-1} \left[\int_{r_1}^r \alpha_m T(r) r dr + (r^2 + r_1^2)(r_1^2 - r_2^2)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_m T(r) r dr \right], \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \sigma_t = & (r_1^2 - r_2^2)^{-1} (r_1^2 p - r_1^2 P) + r^{-2} r_1^2 r_2^2 (p - P)(r_1^2 - r_2^2) + \\ & + E_c r^{-2} (\mu_m - 1)^{-1} \left[\alpha_m T(r) - \int_{r_1}^r \alpha_m T(r) r dr + (r_1^2 + r^2)(r_1^2 - r_2^2)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_m T(r) r dr \right], \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\sigma_z = (r_2^2 - r_1^2)^{-1} (Pr_1^2 - qr_2^2) + E_m (\mu_m - 1)^{-1} \left[\alpha_m T(r) + \frac{2}{r_1^2 - r_2^2} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_m T(r) r dr \right]. \quad (3.8)$$

Для середнього циліндра, виготовленого зі скла:

$$\begin{aligned} \sigma_R = & (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \left[R^{-2} R_1^2 R_2^2 (P - p) - (R_2^2 P - R_1^2 p) \right] + \\ & + E_c R^{-2} (\mu_c - 1)^{-1} \left[\int_{R_1}^R \alpha_c T(R) R dR + (R_1^2 - R^2) (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_c T(R) R dR \right], \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \sigma_t = & (R_1^2 - R_2^2)^{-1} \left[R_2^2 P - R_1^2 p + R^{-2} R_1^2 R_2^2 (P - p) \right] + \\ & + E_c R^{-2} (\mu_c - 1)^{-1} \left[- \int_{R_1}^R \alpha_c T(R) R dR + (R_1^2 + R^2) (R_1^2 - R_2^2)^{-1} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_c T(R) R dR + \alpha_c T(R) \right], \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\sigma_z = (PR_2^2 - pR_1^2) (R_1^2 - R_2^2) - E_c (1 - \mu_c) \left[-2 (R_1^2 - R_2^2)^{-1} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_c T(R) R dR - \alpha_c T(R) \right]. \quad (3.11)$$

Для зовнішнього циліндра, виготовленого з компаунду:

$$\begin{aligned} \sigma_R = & (\rho_2^2 P_2 - \rho_1^2 P) (\rho_1^2 - \rho_2^2)^{-1} + \rho^{-2} \rho_1^2 \rho_2^2 (P - P_2) (\rho_1^2 - \rho_2^2)^{-1} + \\ & + E_k \rho^{-2} (\mu_k - 1)^{-1} \left[\int_{\rho_1}^{\rho} \alpha_k T(\rho) \rho d\rho + (\rho^2 - \rho_1^2) (\rho_1^2 - \rho_2^2)^{-1} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \alpha_k T(\rho) \rho d\rho \right], \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \sigma_t = & (\rho_1^2 - \rho_2^2)^{-1} \left((\rho_2^2 P_2 - \rho_1^2 P) + \rho^{-2} \rho_1^2 \rho_2^2 (P - P_2) \right) + \\ & + E_k (\mu_k - 1) \rho^{-2} \left[\alpha_k T(\rho) - \int_{\rho_1}^{\rho} \alpha_k T(\rho) \rho d\rho - (\rho_1^2 + \rho^2) (\rho_2^2 - \rho_1^2)^{-1} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \alpha_k T(\rho) \rho d\rho \right], \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\sigma_z = (P_2 \rho_2^2 - P \rho_1^2) (\rho_1^2 - \rho_2^2) + E_k (\mu_k - 1) \left[\alpha_k T(\rho) + 2 (\rho_1^2 - \rho_2^2)^{-1} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \alpha_k T(\rho) \rho d\rho \right]. \quad (3.14)$$

Отримані залежності дають можливість визначити осьові, радіальні і окружні напруження в будь-якій точці матеріалу електронних виробів РЕА, що приводяться до розрахункової схемою тришарових циліндрів.

3.2 Аналіз отриманих залежностей. Епюри напружень і тисків

З метою створення таких температурних режимів склоспая і відпалу, а також підбору матеріалів з такими властивостями, щоб виниклі напруження були мінімальними, будемо досліджувати як контактний тиск p і P , напруження σ_z , σ_t , σ_R залежать від законів зміни температури по радіусу елемента, розміру деталей, а також від розкиду значень фізико-механічних характеристик з'єднувальних матеріалів.

Із залежностей (2.40)–(2.45), (2.54)–(2.60), (3.6)–(3.14) випливає, що чим більшим є градієнт зміни температури, тим більшими є виниклі при цьому напруження. Звідси, чим рівномірніше буде змінюватися температура по радіусу елемента, тим менші напруження виникнуть при цьому. з формул (2.55)–(2.57) при $r_1 = 0$ і $P_1 = 0$, знаючи закон зміни температури $T = T(R)$ по радіусу скляної пластини, можна отримати залежності для розрахунку напружень у вікончатих склоспаях (рис. 2.2, а). Аналогічно, поклавши в формулах (3.6)–(3.8) $r_1 = 0$ і $P_1 = 0$, можна отримати залежності для розрахунку напружень в бусинкових склоспаях або компаундованих виробих (рис. 2.2, в, г).

Для аналізу отриманих залежностей і побудови епюр σ_R , σ_t , σ_z розглянемо, до прикладу, степеневий закон (2.48) і для різноманітних « n » побудуємо зазначені епюри. Для побудови епюр спростимо інтеграли:

$$\int_{R_1}^{R_2} T(R)RdR, \quad (3.15)$$

$$\int_{R_1}^R T(R)RdR, \quad (3.16)$$

де $T(R) = (T_{R_2} - T_{R_1})(R - R_1)^n (R_2 - R_1)^{-n} + T_{R_1},$

$$\int_{R_1}^{R_2} [(T_{R_1} - T_{R_2})(R_1 - R)^n (R_2 - R_1)^{-n} + T_{R_1}] R dR = (T_{R_1} - T_{R_2})(R_1 - R_2)^{-n} \int_{R_1}^{R_2} (R - R_1)^n R dR + 0.5 T_{R_1} (R_2^2 - R_1^2). \quad (3.17)$$

Використовуючи метод інтегрування частинами і спрощуючи вирази, отримаємо:

$$\int_{R_1}^{R_2} T(R)RdR = 0.5 T_{R_1} (R_2^2 - R_1^2) + [T_{R_2} - T_{R_1}] (n+1)^{-1} (n+2)^{-1} (R_2^2 - R_1^2) [(n+1)R_2 + R_1]. \quad (3.18)$$

Аналогічно маємо

$$\int_{R_1}^R T(R)RdR = 0.5 T_{R_1} (R^2 - R_1^2) + (T_{R_2} - T_{R_1}) (n+1)^{-1} (n+2)^{-1} (R - R_1) [(n+1)R + R_1]. \quad (3.19)$$

Розглянемо деякі окремі частинні випадки. Для зручності порівняння розрахункові формули і епюри зведемо в таблицю 3.1.

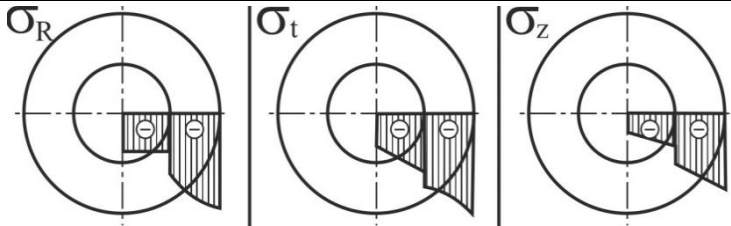
Вікончатий склоспай піддається дії зовнішнього тиску P_2 . За радіусу скляної частини виробу температура змінюється за лінійним законом (у формулі (2.48) $n = 1$), а по радіусу зовнішньої частини виробу – є постійною.

Аналіз цієї таблиці дозволяє зробити висновки про характер зміни величини напружень по радіусу елементу, визначити місце розташування найнапруженішої точки матеріалу, дати висновок про найбільш прийнятні (з точки зору міцності) закони розподілу температури по радіусу елементу.

Таблиця 3.1 - Різні частинні випадки для вікончатих склоспайв

Вікончатий склоспай, $r_1 = 0$, $P_1 = 0$, (рис. 2.1, а). Виріб знаходиться під дією зовнішнього тиску P_2 при постійній температурі, що відповідає $n = 0$ в формулі (2.48)		
Контактний тиск		$p = \frac{\Delta T(\alpha_c - \alpha_m) + E_m^{-1} P_2 R_2^2 (\mu_m - 2)(R_1^2 - R_2^2)^{-1}}{\left[(2\mu_m - 1)R_1^2 - (1 + \mu_m)R_2^2 \right] E_m^{-1} (R_1^2 - R_2^2)^{-1} - E_c (2\mu_c - 1)}$
Внутрішній циліндр (скляний)	σ_r	$\sigma_r = -p$
	σ_t	$\sigma_t = -p$
	σ_z	$\sigma_z = -p$
Зовнішній циліндр (металічний)	σ_R	$\sigma_R = (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \left[2 \left[R_2 q - R_2^2 P \right] - R_1^2 R_2^2 (q - P_2) R^{-2} \right]$
	σ_t	$\sigma_t = (R_1^2 - R_2^2)^{-1} \left(R_2^2 P_2 - R_1^2 p + R_1^2 R^{-2} R_2^2 (P_2 - p) \right)$
	σ_z	$\sigma_z = (R_1^2 - R_2^2)^{-1} \left[P_2 R_2^2 - q R_1^2 \right]$
Епюри		
Вікончатий склоспай, який піддається дію зовнішнього тиску P_2 , у якого температура по радіусу виробу змінюється за лінійним законом, тобто у формулі (9.48) $n = 1$		
p		$p = \frac{\frac{\alpha}{3} (2T_{R_2} + T_{R_1}) \cdot \frac{\alpha_m}{R_2^2 - R_1^2} \left[\frac{T_{R_2} + T_{R_1}}{3} (R_2 - R)(R_2^2 - R_1^2) \right] + \frac{P_2 R_2^2 (2 - \mu_m)}{E_m (R_2^2 - R_1^2)}}{\frac{1 - 2\mu_c}{E_c} + \frac{(1 - 2\mu_m)R_1^2 + (1 + \mu_m)R_2^2}{E_m (R_2^2 - R_1^2)}}$
σ_r		$\sigma_r = -p$
$\sigma_t = \sigma_R$		$\sigma_t = \sigma_z = -p - \alpha_c E_c (\mu_c - 1) (T_{R_1} - T_{R_2}) (R/3 - r/r_2)$

Продовження таблиці 3.1

	$\sigma_R = (R_1^2 - R_2^2)^{-1} \left[R_1^2 R^{-2} R_2^2 (p - P_2) - R_1^2 p + R_2^2 P_2 \right] + \alpha_m E_m (1 - \mu_m) \times$ $\times R^{-2} \left\{ - \left[\left((T_{R_2} - T_{R_1}) / 6 \right) (R - R_1) (2R + R_2) - 0.5 T_{R_1} (R_1^2 - R_2^2) \right] + \right.$ $\left. + (R_1^2 - R_2^2) (R_1^2 - R_2^2)^{-1} \left[\left((T_{R_2} - T_{R_1}) / 6 \right) (R_2 - R_1) (2R_2 + R_1) - 0.5 T_{R_1} (R_1^2 - R_2^2) \right] \right\}$
	$\sigma_t = (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \left[R_1^2 R^{-2} R_2^2 (p - P_2) + R_1^2 p - R_2^2 P_2 - \alpha_m E_m (\mu_m - 1)^{-1} \right] \times$ $\left\{ \left[\left((T_{R_2} - T_{R_1}) / 6 \right) (R - R_1) (2R + R_2) + \frac{T_{R_1} (R^2 - R_1^2)}{2} \right] + \right.$ $\times R^{-2} \left\{ + (R^2 - R_2^2) (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \left[\left((T_{R_2} - T_{R_1}) / 6 \right) (R_2 - R_1) (2R_2 + R_1) + 0.5 T_{R_1} (R_2^2 - R_1^2) \right] \right\}$ $\left. + (T_{R_1} - T_{R_2}) - T_{R_1} \right\}$
	$\sigma_z = (P_2 R_2^2 - p R_1^2) (R_1^2 - R_2^2)^{-1} - \alpha_m E_m (\mu_m - 1) \times$ $\left\{ 2 (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \left[\left((T_{R_2} - T_{R_1}) / 6 \right) (R_2 - R_1) (2R_2 + R_2) - 0.5 T_{R_1} (R_1^2 - R_2^2) \right] + \right.$ $\left. + (T_{R_1} - T_{R_2}) (R_1 - R_2)^{-1} (R_1 - R) - T_{R_1} \right\}$
Епюри	
p	$p = \left[-\alpha_m T_{R_2} + \frac{\alpha_c}{3} (2T_{R_2} + T_{R_1}) + P_2 R_2^2 (2 - \mu_m) E_m^{-1} (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \right] \times$ $\times \left[(1 - 2\mu_c) E_c^{-1} + \left((1 - 2\mu_m) R_1^2 + (1 + \mu_m) R_2^2 \right) E_m^{-1} (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \right]$
σ_r	$\sigma_r = -p$
σ_t	$\sigma_t = E_c \alpha_c (1 - \mu_c)^{-1} \cdot \left(\frac{2}{3} - \frac{r}{r_2} \right) (T_{R_2} - T_{R_1}) - p$
σ_z	$\sigma_z = E_c \alpha_c (1 - \mu_c)^{-1} \cdot (T_{R_2} - T_{R_1}) \left(\frac{2}{3} - \frac{r}{r_2} \right) - p$

Продовження таблиці 3.1

σ_R	$\sigma_R = (R_1^2 - R_2^2)^{-1} [R_1^2 R^{-2} R_2^2 (p - P_2) - R_1^2 p + R_2^2 P_2 +]$
σ_t	$\sigma_t = (R_1^2 - R_2^2)^{-1} [R_2^2 P_2 + R_1^2 R^{-2} R_2^2 (P_2 - p) - R_1^2 p +]$
σ_z	$\sigma_z = (R_1^2 - R_2^2)^{-1} (P_2 R_2^2 - p R_1^2)$
Епюри	

Висновки до третього розділу

У розділі встановлені залежності контактних тисків і напружень у радіоелементах і компонентах, конструкція яких може бути схематизована як конструкція тришарових циліндрів. До таких об'єктів відносяться резистори, діоди, конденсатори, вкриті шаром епоксидного компаунду:

1. Удосконалено математичну модель, що описує контактні тиски і напруження, що дало змогу оцінювати міцність в елементах РЕА, що приводяться до схеми тришарових циліндрів, при одночасній дії тиску і температури.

2. Встановлені залежності тисків і напружень напружень у досліджуваних конструкціях електронних елементів дали змогу зробити висновки про характер зміни величини напружень по радіусу елемента.

3. Побудовано епюри тисків і напружень у досліджуваних конструкціях електронних елементів, що дало змогу визначити місце розташування найнапруженішої точки матеріалу, дати висновок про найбільш прийнятні (з точки зору міцності) закони розподілу температури по радіусу елемента.

4 РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ РЕА

4.1 Методика визначення допустимого розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів, що використовуються при виготовленні РЕА

У всіх випадках вирази для визначення радіальних, окружних і осьових напружень, контактних тисків істотно залежать від величин фізико-механічних характеристик (ФМХ) (α , E , μ), використаних матеріалів. Оскільки всі ФМХ мають певний розкид, обумовлений технічними умовами на використані матеріали, а властивості цих матеріалів визначаються досконалістю технології їх виготовлення, точністю дотримання цієї технології, якістю вихідної сировини та іншими факторами, то ФМХ різних партій одного і того ж матеріалу відрізняються один від одного, і, як показує практика, розкид цих характеристик часто навіть перевершує величини, зазначені в ТУ.

Добре відомо, а також видно з формул (2.54) - (2.60), (2.66) - (2.74), що однією з основних причин виникнення внутрішніх залишкових напружень у елементах РЕА є розбіжність коефіцієнтів лінійного температурного розширення (КЛТР) різних матеріалів. Дослідимо, як впливають на значення q , σ_r , σ_t , σ_z відмінності у коефіцієнтах Пуассона і модулів пружності матеріалів, що з'єднуються, відхилення від геометричних розмірів деталей.

Природно, що при розробці нової РЕА конструктор повинен підібрати матеріали з досить близькими ФМХ, а оцінювання міцності РЕА повинне проводитися із залученням теорій міцності. Для оцінювання міцності скляних частин виробів може бути використана теорія міцності - теорія найбільших нормальних напружень.

Оскільки відповідно до формул таблиці 2.1 маємо $\sigma_r = \sigma_t = -P$, то можна записати умову міцності:

$$|p| \leq [P], \quad (4.1)$$

де $[p]$ – допустимий контактний тиск.

При постійній по радіусу температурі контактний тиск є скалярною функцією векторного аргументу рівномірності “9”:

$$p = p(\bar{x}), \quad (4.2)$$

де $\bar{x} = (\alpha_m; \alpha_c; E_m; E_c; \mu_m; \mu_c; r_1; R_1; R_2)$.

Визначимо, при яких значеннях координат вектора \bar{x} виконується умова (3.1). Знайдемо такі дев'ятимерні паралелепіпеди, в кожній точці яких буде виконуватися вказане нерівність. Фізично це означає, що якщо величини фізико-механічних характеристик і геометричних розмірів деталей, що з'єднуються задовольняють деякою нерівністю, то дана конструкція буде задовольняти умові міцності.

Слід зауважити, що шуканий паралелепіпед в загальному випадку може бути не єдиним. Тому для конкретизації припустимо, що шуканий паралелепіпед має своїм центром точку $\bar{x}^\circ = (\alpha_m^\circ; \alpha_c^\circ; E_m^\circ; E_c^\circ; \mu_m^\circ; \mu_c^\circ; r_1; R_1; R_2)$, координати якої є номінальними значеннями відповідних параметрів. При цьому передбачається, що в цій точці умова (4.1) виконується.

Для вирішення завдання розглянемо вектор:

$$\bar{x}^* = \bar{x}^\circ + \lambda \bar{x}^\circ \text{sign} [\text{grad } p(\bar{x}^\circ)], \quad (4.3)$$

де λ – невідомий скалярний параметр, виражений у відносних одиницях або у відсотках допустимого відхилення фізико-механічних характеристик матеріалів і геометричних розмірів деталей від їх номінальних значень:

$\text{grad } p(\bar{x}) = \left(\frac{\partial p}{\partial \alpha_\mu}; \frac{\partial p}{\partial \alpha_c}; \frac{\partial p}{\partial E_\mu}; \frac{\partial p}{\partial E_c}; \frac{\partial p}{\partial \mu_\mu}; \frac{\partial p}{\partial \mu_c}; \frac{\partial p}{\partial r_1}; \frac{\partial p}{\partial R_1}; \frac{\partial p}{\partial R_2} \right)$ – градієнт функції

$p(\bar{x})$, і знайдемо таке значення λ , при якому:

$$|p(\bar{x}^*)| \leq [p(\bar{x})]. \quad (4.4)$$

Аналіз компонент вектора $\text{grad } p(\bar{x})$ показує, що при зміні векторного аргументу \bar{x} координати градієнта не змінюють своїх знаків, тобто всередині області, в якій сама функція не може мати екстремальних точок і умова $|p(\bar{x}^*)| = [p]$ може задовольнитися тільки на границі області, в якій.

Підставляємо вираз (4.3) в рівняння $p(\bar{x}^*) = [p]$ і отримуємо рівняння алгебри з одним невідомим для визначення λ . Це рівняння можна розв'язати, наприклад, методом Ньютона. знайдене значення λ дозволить записати в формулу (4.3) допустимі значення розбросов фізико-механічних характеристик, при яких виконується умова міцності. Формула (4.3) в координатах запишеться:

$$\begin{aligned} \alpha_\mu^* &= \alpha_\mu^0 + \lambda \alpha_\mu^0 \text{sign} \left(\frac{\partial p}{\partial \alpha_\mu} \right); & \alpha_c^* &= \alpha_c^0 + \lambda \alpha_c^0 \text{sign} \left(\frac{\partial p}{\partial \alpha_c} \right) \\ E_\mu^* &= E_\mu^0 + \lambda E_\mu^0 \text{sign} \left(\frac{\partial p}{\partial E_\mu} \right); & E_c^* &= E_c^0 + \lambda E_c^0 \text{sign} \left(\frac{\partial p}{\partial E_c} \right); \\ \mu_\mu^* &= \mu_\mu^0 + \lambda \mu_\mu^0 \text{sign} \left(\frac{\partial p}{\partial \mu_\mu} \right); & \mu_c^* &= \mu_c^0 + \lambda \mu_c^0 \text{sign} \left(\frac{\partial p}{\partial \mu_c} \right); \\ r_1^* &= r_1^0 + \lambda r_1^0 \text{sign} \left(\frac{\partial p}{\partial r_1} \right); & R_1^* &= R_1^0 + \lambda R_1^0 \text{sign} \left(\frac{\partial p}{\partial R_1} \right); \\ R_2^* &= R_2^0 + \lambda R_2^0 \text{sign} \left(\frac{\partial p}{\partial R_2} \right). \end{aligned} \quad (4.5)$$

Знак похідної від функції $q(x)$ за відповідною змінною визначає, чи повинен цей параметр збільшити (+) або зменшити (–) своє значення при зростанні функції $q(x)$, а параметр λ вказує, на яку частину від номінального значення змінюється величина відповідної змінної.

Виникає можливість запропонувати розрахункову методику для визначення допустимих розкиду ФМХ матеріалів, що з'єднуються і геометричних розмірів деталей, що передбачає наступну послідовність операцій:

1. Перевіряється виконання умови міцності (4.1) при номінальних значеннях фізико-механічних характеристик і геометричних розмірів. Якщо умова (4.1) не виконується, то координати номінальної точки слід змінити, що фізично відповідає вибору інших матеріалів або геометричних розмірів деталі. Якщо ж умова формули (4.1) виконана, то слід перейти до виконання п. 2.

2. Визначаються значення координат $\text{grad } p(\bar{x})$ у номінальній точці.

3. Складають вираз (4.3).

4. Вираз (4.3) підставляється у рівняння $p(\bar{x}^*) = [p]$.

5. Рівняння $p(\bar{x}^*) = [p]$ розв'язується відносно λ одним з численних методів, наприклад, методом Ньютона [47, 48].

6. За отриманим значенням λ записуються границі шуканого паралелепіпеда у вигляді формул (4.4).

Описана методика може бути використана для розрахунку допустимого розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів, що з'єднуються і в разі довільних законів зміни температури по радіусу за умови, що в області зміни векторного аргументу \bar{x} градієнт функції не змінює знака, тобто функція не має екстремальних точок. Викладена методика дає можливість висунути обґрунтовані вимоги до розкиду ФМХ і розмірів, вирішити питання про можливість працездатності з'єднання взагалі (при заданих геометричних розмірах елементу) і ще на етапі проектування підбирати працездатні за

міцністю матеріали. Зауважимо, що при використанні сучасних комп'ютерів розв'язання поставленого завдання може бути здійснено і іншими способами. Наприклад, прямим перебором всіляких комбінацій значень координат вектора \bar{x} або методом Монте-Карло. З цією метою (за умови дотримання умови міцності в номінальній точці x_0) кожної координаті вектора \bar{x}^0 задається деяке відхилення:

$$(\pm\Delta\alpha_m); (\pm\Delta\alpha_c); (\pm\Delta E_m); (\pm\Delta E_c); (\pm\Delta\mu_m); (\pm\Delta\mu_c); (\pm\Delta r_1); (\pm\Delta R_1); (\pm\Delta R_2),$$

при цьому утворюється дев'ятимірний паралелепіпед. Якщо в кожній вершині цього паралелепіпеда умова (4.1) виконується, то абсолютні значення відхилень координат збільшуються доти, поки умова міцності (4.1) не перестане виконуватися.

4.2 Методика визначення температурних напружень у вільних і затиснених пластинах РЕА при довільних законах розподілу температури по радіусу

У низці випадків можна не враховувати податливості защемлення скляної частини елементів вузлів мікроприладів, наприклад, в бусинкових склоспаях вивідних контактах потужних транзисторів. Для цих випадків пропонується наступна спрощена методика розрахунку температурних напружень.

Запропонована методика є узагальненням викладеної в [49] схеми розрахунку, де розглядається тільки лінійний закон зміни температури по радіусу круглої пластини. У загальному випадку, коли температура є функцією радіуса ($T = T(R)$), напруження в довільній точці круглої пластини визначаються рівняннями [49, 50]:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= E\alpha\left(R^{-2} \cdot \int_0^R T(r)rdr - r^{-2} \int_0^r T(r)rdr\right), \\ \sigma_t &= E\alpha\left(R^{-2} \cdot \int_0^R T(r)rdr - r^{-2} \int_0^r T(r)rdr\right).\end{aligned}\quad (4.6)$$

У разі, коли температура є лінійною функцією радіуса, що зростає від центру до контуру, закон зміни температури [49]:

$$T_r = T_0 + A_r, \quad (4.7)$$

де T_0 – температура в центрі пластинки; A_r – перевищення температури в точках, розташованих на радіусі r над температурою в центрі.

Значення постійної в рівнянні (4.7) дорівнює:

$$A = \frac{T_R - T_0}{R}. \quad (4.8)$$

В результаті інтегрування вихідних рівнянь (4.6) маємо:

$$\sigma_r = E\alpha \frac{(T_0 - T_R)}{3} \left(\frac{r}{R} - 1\right), \quad \sigma_t = E\alpha \frac{(T_0 - T_R)}{3} \left(\frac{2r}{R} - 1\right). \quad (4.9)$$

Підставляючи сюди відповідні граничні умови, отримаємо напруження в центрі ($r = 0$) і на контурі ($r = R$) пластини. Радіальне переміщення у довільній точці пластини $\Delta = r \cdot \varepsilon_t$, де: $\varepsilon_t = \frac{1}{E}(\sigma_t - \mu\sigma_r) + \alpha T(r)$ – відносна радіальна деформація при $\sigma_z = 0$. Підставивши значення напружень і функцію температури, отримуємо:

$$\varepsilon_t = \alpha A \left[(1 - \mu)R + (1 + \mu)r \right] \frac{1}{3} + \alpha T(r). \quad (4.10)$$

Радіальне переміщення контуру пластини [49]:

$$\Delta R = R\alpha(2T_R + T_0)\frac{1}{3}. \quad (4.11)$$

Узагальнимо наведені в [49] формули (4.6) - (4.11) для довільного закону зміни температури:

$$T_r = T_0 + A r^n, \quad (4.12)$$

де n – довільний показник степеню.

Формула (4.11) є аналогічною вже наведеній вище. Беручи до уваги вираз (4.11), інтегруючи формули (4.6), отримаємо більш загальні вирази:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= E\alpha(n+2)^{-1}(T_0 - T_R) \left[\left(\frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right], \\ \sigma_t &= E\alpha(n+2)^{-1}(T_0 - T_R) \left[(n+1) \left(\frac{r}{R} \right)^n - 1 \right]. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Формули (4.13) при підстановці в них $n = 1$ (тобто при лінійному законі зміни температури по радіусу) перетворюються в уже відомі вирази (4.9), що містяться в [49]. Використовуючи вирази (3.13), можна отримати значення радіальних і окружних напружень в будь-якій точці круглої вільної пластини при будь-якому статичному законі зміни температури по радіусу. Вирази для визначення напружень в центрі пластини і на її зовнішньому контурі в загальному випадку будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned}\alpha_{r|_{r=0}} = \sigma_{t|_{r=0}} &= E\alpha \frac{T_R - T_0}{n+2}, \\ \alpha_{r|_{r=R}} = \sigma_{t|_{r=R}} &= -E\alpha \frac{T_R - T_0}{n+2} n.\end{aligned}\quad (4.14)$$

Цілком аналогічно відносна радіальна деформацій в загальному випадку має вигляд:

$$\varepsilon_t = \frac{\alpha A}{n+2} \left[R^n(1-\mu) + r^n(1+\mu) \right] + \alpha T_0. \quad (4.15)$$

Вираз для визначення радіального переміщення контуру пластини:

$$\Delta R = \frac{\alpha R}{n+2} (2T_R + nT_0). \quad (4.16)$$

І тут, в окремому випадку, коли $n=1$, вирази (4.15) і (4.16) перетворюються в уже відомі формули (4.10) і (4.11). Розглядаючи випадок круглої пластини з затисненим контуром, коли температура лінійно змінюється по радіусу, і враховуючи, що радіальне переміщення контуру пластини дорівнює нулю, отримаємо формулу для визначення величини питомої тиску на зовнішній циліндричній поверхні пластини [49]:

$$q = \alpha E \frac{T_0 + 2T_R}{3(1-\mu)}. \quad (4.17)$$

Радіальні тиски викликають в довільній точці пластини напруження стиснення $\sigma_r = \sigma_t = -p$, які підсумовуються з напруженням, що отримуються відповідно до формул (4.19): $\sigma_0 = \alpha E \frac{[2T_0 + T_R + \mu(T_R - T_0)]}{3(1-\mu)}$,

$$\begin{aligned}\alpha_{r|_{r=R}} &= \alpha E \frac{T_0 + 2T_R}{3(1-\mu)}, \\ \alpha_{t|_{r=R}} &= -\alpha E \frac{[3T_R - \mu(T_R - T_0)]}{3(1-\mu)}.\end{aligned}\quad (4.18)$$

З огляду на вираження (4.16) - (4.18), можна отримати вираз для визначення величини питомого тиску при довільному законі зміни температури по радіусу:

$$p = \frac{\alpha E(2T_R + nT_0)}{(n+2)(1-\mu)}.\quad (4.19)$$

Сумарні напруження в центрі і на контурі пластини в цьому випадку:

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= \frac{\alpha E [T_0(n+1) + T_R + \mu(T_R - T_0)]}{(n+2)(1-\mu)}, \\ \alpha_{r|_{r=R}} &= -\frac{\alpha E(2T_R + nT_0)}{(n+2)(1-\mu)}, \\ \alpha_{t|_{r=R}} &= -\frac{\alpha E [T_R(n+2) - \mu n(T_R - T_0)]}{(n+2)(1-\mu)}.\end{aligned}\quad (4.20)$$

В окремому випадку, при лінійному законі зміни температури по радіусу, тобто при $n=1$ у формулі (4.12), отримані нами вирази (4.20) перетворюються в уже відомі за [49] формули (4.18).

4.3 Розрахунок закону розподілу температури для круглої скляної пластини при склоспаюванні на індукційних установках

Досить суттєве значення для визначення величин радіальних σ_r і окружних σ_θ напружень, а також контактної тиску p має знання істинного закону зміни температури по радіусу елемента. Ця обставина грає важливу роль для правильного вибору режиму технологічного відпалу вузлів РЕА, контролю і регулювання внутрішнього напруження, для відпрацювання операції склоспаювання, в процесі якого, як буде показано далі, можуть виникати значні напруження, що залежать від законів зміни температурних полів при охолодженні.

Експериментальне вимірювання температури (контактні термометри, термометрія, термографія, пірометрія, термочутливі фарби, рідкі кристали, термопапір) у багатьох випадках утруднене через специфіку виробів РЕА, тому нижче викладається теоретичний розрахунок температурного поля і температурних напружень для круглої скляної пластини оглядового вузла вікончатого склоспаю (див. рис. 2.1, а) при дії стрибкоподібного теплового режиму, що моделює процес склоспаювання.

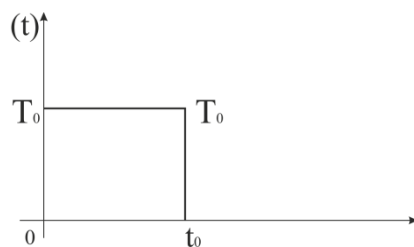


Рис. 4.1 - Стрибкоподібний тепловий режим, що моделює процес склоспаювання

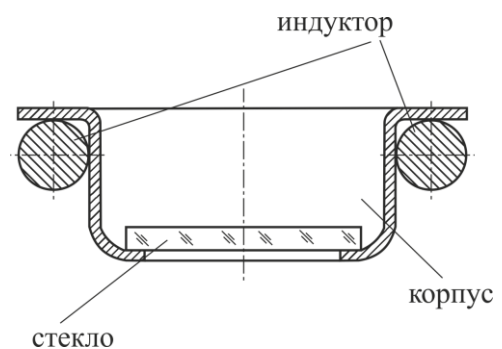


Рис. 4.2 - Схема індукційного вузла, в якому відбувається склоспай

Графік такого теплового режиму представлений на рис. 4.1. Протягом часу t_0 на зовнішню кромку скляної пластинки діє температура T_0 , в результаті чого вузька кільцева зона по кромці пластини розм'якшується до

температури плавлення і з'єднується з металевою кришкою корпусу мікроприладу (див. рис. 4.2). Після цього індуктор вимикається і тим самим припиняється розігрів кришки корпусу і скляної пластини, потім відбувається спільне охолодження кришки корпусу і скляної пластини, в результаті чого і виникає вікончатий склоспай.

Розглянемо структуру температурного поля, що створюється в круговій скляній пластині. При цьому будемо вважати, що температура по товщині стінки металевого циліндра (з огляду на невелику товщину цієї стінки - 0,2 мм) є постійною.

Для аналітичного розрахунку структури температурного поля, що створюється в скляній круговій пластині в результаті дії стрибкоподібного теплового режиму, необхідно розв'язати рівняння теплопровідності [51]:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \chi^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \quad (4.21)$$

за початково-краєвими умовами:

$$T|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial t}|_{r=0} = 0, \quad T|_{t=R} = f(t), \quad (4.22)$$

де $T = T(r, t)$ – температура пластини; t – час; $a = \frac{\lambda}{C \cdot \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності; r – змінний радіус пластини; C – питома теплоємність; ρ – густина матеріалу; $\chi^2 = \frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}$ – коефіцієнт теплообміну; λ – коефіцієнт теплопровідності; δ – товщина пластини; $f(t)$ – функція, що визначає зміну температури в часі на границі скляної пластини. При індукційному способі розігріву ця функція має вигляд:

$$f(t) = T_0 [S_+(t) - S_+(t - t_0)], \quad (4.23)$$

де $S_+(t)$ – асиметрична одинична функція.

У операторній формі ця ж запис має вигляд $f(t) = T_0(I - A_t^{t_0})S(t)$. Для визначення функції $T(t, r)$, що задовольняє рівняння (4.21) і умови (4.22), можна застосувати методи операційного числення. Нехай

$$T^*(p, r) = \int_0^\infty T(t, r) e^{-pt} dt \quad (4.24)$$

є зображенням шуканої функції $T(t, r)$ при перетворенні Лапласа. Тоді за [52] задача зводиться до відшукування обмеженою на відрізьку $[0, R]$ функції T^* , що задовольняє рівнянню:

$$\frac{d^2 T^*}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT^*}{dr} - q^2 T^* = 0, \quad q = \frac{P}{a} + \chi^2 \quad (4.25)$$

при краєвих умовах $\left. \frac{dT^*}{dr} \right|_{r=0} = 0, \left. T^* \right|_{r=R} = \frac{T_0}{P} (1 - e^{-pt_0})$,

$$T^*(p, r) = \int_0^\infty T(t, r) e^{-pt} dt. \quad (4.26)$$

Безпосередньо перевіряється, що рішення задачі (4.25) - (4.26) має вигляд:

$$T^* = \frac{T_0}{P} \cdot \frac{I_0(qr)}{I_0(qR)} (1 - e^{-pt_0}). \quad (4.27)$$

Повертаючись до задачі відшукування функції $T(t, r)$, що є оригіналом знайденої функції (4.27), за узагальненою теоремою розкладання отримаємо рішення:

$$\begin{aligned}
T &= T_0(I - A_t^t S_+(t) \left[I_0(\chi r) I_0^{-1}(\chi R) - \frac{2}{R} \sum_{n=1}^{\infty} J_0(\beta_n r) \beta_n e^{-a(\chi^2 + \beta_n^2)t} \left(J_1(\beta_n R) (\chi^2 + \beta_n^2) \right)^{-1} \right]) = \\
&= \left\{ S_+(t) \left[I_0(\chi r) I_0^{-1}(\chi R) - \frac{2}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n J_0(r \beta_n) (\chi^2 + \beta_n^2)^{-1} \cdot e^{-a(\chi^2 + \beta_n^2)t} J_1^{-1}(\beta_n R) \right] - \right. \\
&\left. - S_+(t - t_0) \left[I_0(\chi r) I_0^{-1}(\chi R) - \frac{2}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n J_0(r \beta_n) (\chi^2 + \beta_n^2)^{-1} \cdot J_1^{-1}(\beta_n R) e^{-a(\chi^2 + \beta_n^2)(t - t_0)} \right] \right\} T_0,
\end{aligned} \tag{4.28}$$

де $I_0(z)$ – модифікована функція Бесселя першого нульового порядку; $I_n(z)$ – звичайна функція Бесселя першого роду порядку $n(n=0,1)$; β_n – різні корені трансцендентного рівняння $J_0(\beta_n R) = 0$.

Функції Бесселя [53] визначалися таким чином:

$$\begin{aligned}
J_0(z) &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \cdot z^{2k}}{2^{2k} \cdot (k!)}, \\
J_1(z) &= \frac{z}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \cdot z^{2k}}{2^{2k} \cdot k!(k+1)!}, \\
I_0(z) &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^{2k}}{(k!)^2}.
\end{aligned} \tag{4.29}$$

Слід зауважити, що при $\delta \rightarrow \infty$ у рівнянні (4.21) $\chi^2 \rightarrow 0$, тобто отримуємо рівняння для нескінченно довгого циліндра. Результат (4.28) може бути отриманий методом кінцевого інтегрального перетворення Ханкеля [54]. Введемо в розгляд прямі Т-подібні кінцеві інтегральні перетворення Ханкеля 1-го роду за правилами:

$$H_0[p(r)] = \int_0^R p(r) J_0(\beta_n r) r dr \equiv p_n, \quad (4.30)$$

$$H_0^{-1}[p_n] = \frac{2}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q_n J_0(r\beta_n)}{J_1^2(R\beta_n)} \equiv p(r),$$

де β_n – різні корені трансцендентного рівняння $J_0(r\beta_n) = 0$.

Оператор H_0 (4.21)–(4.22) ставить у відповідність задачу інтегрування рівняння:

$$\frac{dT_n}{dt} + a(\chi^2 + \beta_n^2)T_n = aR\beta_n J_1(\beta_n R) f(t) \quad (4.31)$$

за початковою умовою

$$T_n \Big|_{t=0} = 0. \quad (4.32)$$

Безпосередньо перевіряється, що

$$\begin{aligned} T_n &= aR\beta_n J_1(\beta_n R) \int_0^t e^{-a(\chi^2 + \beta_n^2)(t-r)} f(r) dr = aR\beta_n J_1(\beta_n R) T_0 (I - A_t^{t_0}) \int_0^t e^{-a(\chi^2 + \beta_n^2)(t-r)} S_+(r) dr = \\ &= \frac{R\beta_n^2 J_1(\beta_n R)}{\chi^2 + \beta_n^2} T_0 (I - A_t^{t_0}) \left[1 - e^{a(\chi^2 + \beta_n^2)t} \right] S_+(t). \end{aligned} \quad (4.33)$$

Застосовуючи до T_n оператор H_0 , отримаємо:

$$T = \frac{2}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{T_n J_0(r\beta_n)}{J_1^2(R\beta_n)} = \frac{2}{R} T_0 (I - A_t^{t_0}) \left\{ S_+(t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta_n J_0(r\beta_n)}{(\chi^2 + \beta_n^2) J_1(\beta_n R)} \left[1 - e^{-a(\chi^2 + \beta_n^2)t} \right] \right\}. \quad (4.34)$$

Оскільки

$$\int_0^R I_0(r\chi) J_0(r\beta_n) r dr = \int_0^R J_0(i\chi r) J_0(\beta_n r) r dr = -(\beta_n^2 + \chi^2)^{-1} \beta_n r J^{-1}(\beta_n r) J_0(i\chi r) \Big|_0^R = (\chi^2 + \beta_n^2)^{-1} R \beta_n J_1(\beta_n R) I_0(\chi R),$$

то $H_0 I_0(\chi r) I_0^{-1}(\chi R) = (\chi^2 + \beta_n^2)^{-1} R \beta_n J_1(\beta_n R)$, тому:

$$T = T_0 (I - A_t^{t_0}) \cdot \left\{ S_+(t) \left[I_0(\chi r) I_0^{-1}(\chi R) - 2R^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta_n J_0(r\beta_n)}{\chi^2 + \beta_n^2} \cdot \frac{e^{-a(\chi^2 + \beta_n^2)t}}{J_1(\beta_n R)} \right] \right\},$$

що збігається з формулою (4.28). Знаючи закон зміни температури по радіусу круглої скляної пластини, можна визначити контактний тиск, окружне, радіальне і осьове напруження.

4.4 Методика визначення сумарних залишкових (і від надлишкового тиску) напружень в вузлах елементів РЕА

Багато мікроприладів, системи автоматичного регулювання, РЕА, що експлуатується на літальних апаратах при змінних кліматичних умовах (тиску, температури, вологості), герметизуються різними способами, і ті конструкції, в яких після герметизації залишається повітря, зі збільшенням висоти польоту об'єкта можуть відчувати вплив з боку надлишкового внутрішнього тиску.

І хоча величина надлишкового тиску не перевищує 1 кгс/см^2 ($9,8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$), навантаження на елементи корпусу, підкладку, плати, що при цьому розвиваються, можуть призводити до деформації останніх, передаватися на мікроелементи, викликаючи поломки або відмови апаратури через розгерметизацію, і тому в процесі її створення необхідно чітко уявляти, до яких наслідків можуть привести зростаючі з висотою навантаження і вміти їх визначати розрахунковим або експериментальним шляхами.

Як показує досвід експлуатації досліджуваних елементів РЕА, відмови фоторезисторів, фотодатчиків і мікроприладів часто мають місце при відсутності або при низькому атмосферному тиску. Порушення механічної

цілісності і розгерметизація відбуваються в тих випадках, коли сумарна величина експлуатаційних і залишкових технологічних напружень досягає небезпечної величини. Практика показує, що руйнуванню піддаються окремі екземпляри РЕА. Це пояснюється тим, що певні екземпляри вузлів і корпусу мікроприладів в результаті відпалу зберігають значні залишкові напруження, які, додаючись до експлуатаційних напружень, призводять у багатьох випадках до руйнування і відмови мікроприладів РЕА в процесі їх служби. Виходу з ладу мікроприладів РЕА через розтріскування скляних частин і вузлів, як буде показано далі, сприяє також наявність дефектів матеріалу (мікротріщини, подряпини тощо). Тому надзвичайно важливо вміти визначати і враховувати ще при проектуванні мікроприладів РЕА напруження, що виникають в їх деталях і вузлах від перепаду тиску.

У низці випадків корпуси або порожнини, в яких після герметизації на землі залишилося повітря, можуть розглядатися як тонкостінні оболонки, що знаходяться під дією розподіленого внутрішнього тиску P , що дорівнює різниці між атмосферним тиском на рівні землі і розглянутій висоті. У загальному випадку для тіла вісесиметричної форми без переломів розрахунок можна проводити за рівнянням Лапласа:

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{P}{h}, \quad (4.36)$$

де σ_m і σ_t – меридіальне і окружне напруження; ρ_m і ρ_t – меридіальний і окружний радіуси; h – товщина оболонки; P – надлишковий внутрішній тиск.

В окремому випадку, якщо порожнина може бути представлена у вигляді циліндра, напруження далеко від торців знаходяться за формулами:

$$\sigma_m = \frac{PR}{2h}, \quad \sigma_t = \frac{PR}{h}, \quad (4.37)$$

де R – радіус циліндра.

Слід мати на увазі, що дніща цих циліндрів можуть згинатися і їх розрахунок має проводитися за теорією згину тонких пластинок. Якщо порожнина сферична, то з умов симетрії:

$$\sigma_m = \sigma_t = \frac{PR}{2h}. \quad (4.38)$$

При інших формах і з урахуванням всіх факторів формули істотно ускладнюються і вимагають експериментального підтвердження. Оцінювання міцності за знайденим меридіальним і окружним напруженням повинна проводитися із залученням теорій міцності в залежності від матеріалу і його напруженого стану.

Схематично вікончатий спай фоторезистора, навантаженого внутрішнім тиском (наприклад, при відкачуванні повітря з випробувальної камери) можна зобразити так, як показано на рис. 4.3. Внутрішній тиск можна замінити розподіленою по площі навантаженням з інтенсивністю q .

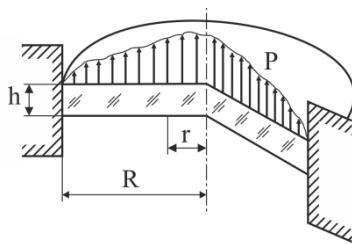


Рис. 4.3 - Схема вікончатого спаяний фотодатчика, що зазнає перепад тиску

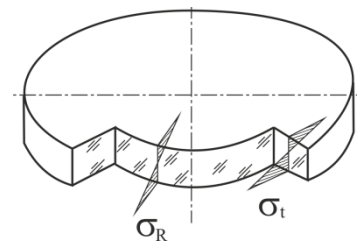


Рис. 4.4 - Епюри розподілу окружних і радіальних нормальних напружень по товщині пластини

У меридіальних перерізах пластинки діють окружні нормальні напруження σ_t , що змінюються по товщині за лінійним законом. В циліндричних перерізах діють радіальні нормальні напруження σ_r , що також змінюються за лінійним законом (рис. 4.4), а також дотичні напруження τ , які в тонких пластинках є меншими за нормальні, тому при розрахунку на міцність їх не враховують.

Максимальні напруження у поверхні пов'язані з внутрішніми згинальними моментами залежностями:

$$\sigma_{t_{\max}} = \pm \frac{6M_t}{h^2}; \quad \sigma_{r_{\max}} = \pm \frac{6M_r}{h^2}, \quad (4.39)$$

де h – товщина пластинки; позитивні напрямки моментів показані на рис. 4.5.

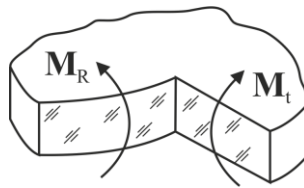


Рис. 4.5 - Позитивний напрямок згинальних моментів

В циліндричних перерізах діють також внутрішні поперечні сили Q . З умов рівноваги елемента пластинки:

$$\begin{cases} \frac{d}{dr}(rQ) = qr, \\ \frac{d}{dr}(rM_r) - M_t = Qr \end{cases} \quad (4.40)$$

І співвідношень

$$M_r = D \left(\frac{\mu}{r} \frac{dy}{dr} + \frac{d^2 y}{dr^2} \right),$$

$$M_t = D \left(\mu \frac{d^2 y}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dy}{dr} \right),$$
(4.41)

де $D = \frac{Eh^3}{(1-\mu^2)12}$ – циліндрична жорсткість пластини; y – прогини, позитивний напрямок яких прийнято вгору, вводиться диференціальне рівняння:

$$\frac{d^4 y}{dr^4} + 2r^{-1} \frac{d^3 y}{dr^3} - r^{-2} \frac{d^2 y}{dr^2} + r^{-3} \frac{dy}{dr} = \frac{p}{D}.$$
(4.42)

Загальний розв'язок цього рівняння має вигляд:

$$y(r) = C_1 \ln r + C_2 \cdot \ln r \cdot r^2 + C_3 r^2 + C_4 + y^*(r),$$
(4.43)

де $y^*(r)$ – частинний розв'язок, що залежить від закону розподілу навантаження p .

Для рівномірно розподіленого навантаження:

$$y^*(r) = \frac{pr^4}{64D}$$
(4.44)

довільні постійні визначаються з граничних умов. Після визначення прогинів визначаються згинальні моменти і напруження.

Розрахуємо для конкретного випадку затисненої по контуру круглої пластини радіуса R , навантаженої рівномірно розподіленим тиском. Щоб прогини в центрі пластинки були кінцевими, вважаємо: $C_1 = C_2 = 0$.

З граничних умов закладення $y(R) = \frac{dy}{dr}(R) = 0$ знаходимо C_3 і C_4 ,

звідки:

$$y = \frac{pR^4}{64d} [1 - r^2 R^{-2}]^2. \quad (4.45)$$

Максимальний прогин в центрі пластинки:

$$y_{\max} = \frac{3(1 - \mu^2)}{16} \cdot \frac{pR^4}{Eh^3}. \quad (4.46)$$

Згинальні моменти:

$$\begin{aligned} M_r &= \frac{pR^2}{16} \left[(3 + \mu) \left(\frac{r}{R} \right)^2 - (1 + \mu) \right] \\ M_t &= \frac{pR^2}{16} \left[(1 + 3\mu) \left(\frac{r}{R} \right)^2 - (1 + \mu) \right]. \end{aligned} \quad (4.47)$$

Напруження досягають максимальної величини в циліндричному перерізі у закладенні (при $r = R$):

$$\sigma_{r_{\max}} = 0.75 \frac{pR^2}{h^2}. \quad (4.48)$$

Подібні залежності містяться в [55, 56]. За викладеною методикою визначаються напруження в круглій скляній пластині при роботі виробу в розріджених шарах атмосфери або при надмірному зовнішньому тиску. Насправді напруження будуть дещо більшими, оскільки необхідно враховувати деформацію самого корпусу фоторезистора.

Корпус фоторезистора можна розглядати як тонкостінну оболонку. Методика розрахунку таких оболонок є досить повно викладеною, наприклад, в довідковому посібнику Біргера. Розглянемо найзагальніший випадок – циліндричну оболонку постійної товщини під дією

осесиметричних навантажень і нагрівання. Якщо умовно прийняти за $y(x)$ радіальне переміщення точок серединної поверхні, то при цьому додатньому значенню відповідає переміщення точок по колу більшого радіусу. У результаті отримуємо таке диференціальне рівняння:

$$D \frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{Eh}{a^2} y = p + \frac{Eh}{a} \alpha T_0 - D(1 + \mu) \frac{d^2}{dx^2} \left(\alpha \frac{\Delta T}{h} \right), \quad (4.49)$$

де a – радіус серединної поверхні; h – товщина оболонки; $D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)}$ – циліндрична жорсткість; E – модуль пружності матеріалу; μ – коефіцієнт Пуассона; p – розподілене навантаження, прикладене до серединної поверхні оболонки, тобто внутрішній тиск; α – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу оболонки; T_0 – температура серединної поверхні оболонки; ΔT – різниця температур зовнішньої і внутрішньої поверхні оболонки.

Будемо вважати розподіл температури по товщині тонкої стінки лінійним. У поперечному перерізі оболонки (перетині, перпендикулярному осі на одиницю довжини діють:

– перерізувальна сила

$$Q = D \left[\frac{d^3 y}{dx^3} + (1 + \mu) \frac{d}{dx} \left(\alpha \frac{\Delta T}{h} \right) \right], \quad (4.50)$$

– згинальний момент

$$M_x = D \left[\frac{d^2 y}{dx^2} + (1 + \mu) \alpha \frac{\Delta T}{h} \right]. \quad (4.51)$$

У поздовжньому перерізі (перерізі, що проходить через вісь) на одиницю довжини діють оболонки (рис. 4.6).

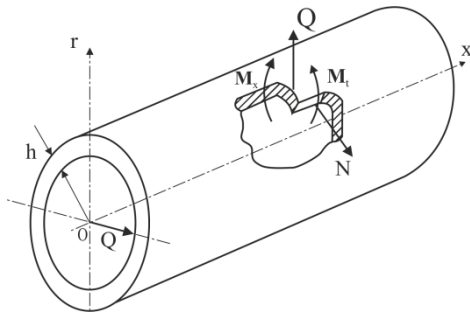


Рис. 4.6 - Внутрішні силові фактори, що діють в циліндричній оболонці

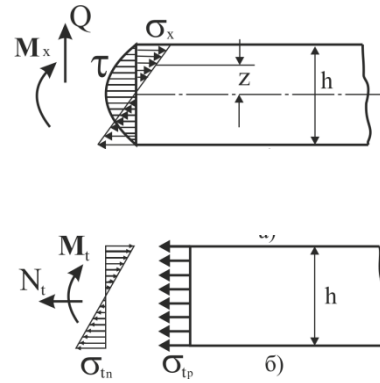


Рис. 4.7 – Напруження в перерізах досліджуваної оболонки

Розтягувальна сила

$$N_t = Eh \left(\frac{y}{a} - \alpha T_0 \right). \quad (4.52)$$

Згинальний момент:

$$M_t = D \left[\mu \frac{d^2 y}{dx^2} + (1 + \mu) \alpha \frac{\Delta T}{h} \right]. \quad (4.53)$$

За відсутності нагріву:

$$M_t = \mu M_x. \quad (4.54)$$

Напруження згину в поперечному перерізі:

$$\sigma_x = - \frac{12 M_x}{h^3} z. \quad (4.55)$$

Дотичні напруження в поперечному перерізі:

$$\tau = \frac{Q}{h} \left(\frac{3}{2} - \frac{6z^2}{h^2} \right). \quad (4.56)$$

У поздовжньому перерізі виникають нормальні напруження розтягування:

$$\sigma_{t_{\text{раст.}}} = -N_t / h \quad (4.57)$$

і згину:

$$\sigma_{t_{\text{изг.}}} = -\frac{12M_t}{h^3} z. \quad (4.58)$$

Нормальні напруження у поздовжньому перерізі:

$$\sigma_t = \frac{N_t}{h} - \frac{12M_t}{h^3} z. \quad (4.59)$$

При виконанні розрахунків слід розрізняти довгі і короткі циліндричні оболонки (рис. 4.8). Основна відмінність довгих оболонок полягає в тому, що для них можна знехтувати впливом навантажень, прикладених до одного краю, на напружений стан біля іншого краю. Оболонку можна вважати довгою, якщо параметр оболонки $\beta l \geq 3$.

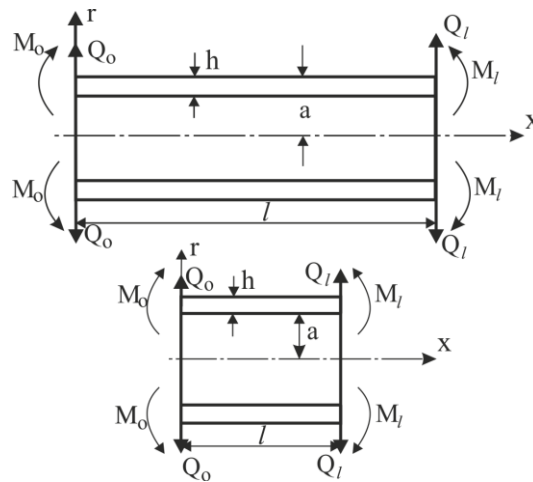


Рис. 4.8 – Довга і коротка оболонки

$$\beta = \frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{ah}} \quad (4.60)$$

Для визначення значень деформацій і напружень необхідно підсумувати напруження з урахуванням одночасного згину скла і деформації циліндричної оболонки. Отримане значення експлуатаційного напруження алгебраїчно підсумовується зі значенням технологічних залишкових напружень, методика визначення яких була викладена в розділі 2. Величина залишкових напружень повинна бути взята за максимальним значенням в небезпечній точці (див. табл. 4.1), тобто з урахуванням дійсного закону зміни температури по радіусу виробу або за одним з спрощених законів, що замінює дійсний закон зміни температури.

Висновки до розділу

1. Розроблено практичну методику визначення допустимого розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів, що використовуються при виготовленні РЕА, що полягає у розв'язанні задачі багатокритеріальної оптимізації.

2. Розроблено практичну методику визначення температурних напружень у вільних і затиснених пластинах РЕА при довільних законах розподілу температури по радіусу елемента.

3. Запропоновано метод аналітичного розрахунку закону розподілу температури для круглої скляної пластини при склоспаюванні на індукційних установках, що дає можливість, знаючи закон зміни температури по радіусу круглої скляної пластини, визначити контактний тиск, окружне, радіальне і осьове напруження.

4. Запропоновано методику визначення сумарних залишкових (і від надлишкового тиску) напружень в вузлах елементів РЕА

ВИСНОВКИ

1. Для металоскляних конструкцій деталей РЕА, що мають форму тіла обертання (фоторезистори та ін.), удосконалено математичну модель визначення контактного тиску (напружень), що дало змогу оцінювати міцність конструкції за різних умов впливу зовнішніх і внутрішніх контактних тисків.

2. Обґрунтовано математичну модель, що описує сім'ю статичних законів зміни перепаду температури по радіусу елементу РЕА, що мають вісесиметричну форму, що дало змогу визначати напруження при довільних законах розподілу температури по радіусу виробу.

3. Встановлені залежності тисків і напружень напружень у досліджуваних конструкціях електронних елементів дали змогу зробити висновки про характер зміни величини напружень по радіусу елементу. Побудовано епюри тисків і напружень у досліджуваних конструкціях електронних елементів, що дало змогу визначити місце розташування найнапруженішої точки матеріалу, дати висновок про найбільш прийнятні (з точки зору міцності) закони розподілу температури по радіусу елементу.

4. Розроблено практичну методику визначення допустимого розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів, що використовуються при виготовленні РЕА, що полягає у розв'язанні задачі багатокритеріальної оптимізації.

5. Розроблено практичну методику визначення температурних напружень у вільних і затиснених пластинах РЕА при довільних законах розподілу температури по радіусу елемента.

6. Розроблено практичну методику визначення закону розподілу температури для круглої скляної пластини при склоспаюванні на індукційних установках, що дає можливість знаючи закон зміни температури по радіусу

круглої скляної пластини, визначити контактний тиск, окружне, радіальне і осьове напруження.

7. Запропоновано методику визначення сумарних залишкових (і від надлишкового тиску) напружень в вузлах елементів РЕА

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ройзман В. П. Проблема прочностной надежности в радиоэлектронике //Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005.- С. 6-12
2. Трифанюк В.В. Надійність пристроїв промислової електроніки. – К.: Либідь, 1992
3. Учебное пособие по дисциплине «Основы проектирования электронных средств» / Л. Н. Панков, В. Р. Асланянц, Г. Ф. Долгов, В. В. Евграфов ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 260 с.
4. Ленков С. В. Обеспечение надежности РЕА / С. В. Ленков. – К. : ТЛПУ, 1997. – 48 с.
5. Коробейников А.Г., Пенюгалова Н.В., Груничева Я.В., Керенков Д.В. Исследование свойств отвердевшего компаунда в задачах заливки высоковольтного источника питания // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. №5-1.
6. Механика в электронике. Монография: [в 3 т.] Т. 1: Статическая прочность / Ройзман В. П. - Хмельницкий : ХНУ – 2015. - 313 с.
7. Санжаравский А. Т. Методы расчета внутренних напряжений в полимерах и лакокрасочных покрытиях / А. Т. Санжаравский // Докл. АН СССР. – 1960. – Т. 135. – № 1. – С. 58–60.
8. Zirnheld J. et al. Evaluation of epoxy coated resistors in high voltage DC surge environments //2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). – IEEE, 2016. – С. 715-717
9. Kokatev A. N. et al. Monitoring of properties of epoxy molding compounds used in electronics for protection and hermetic sealing of microcircuits //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 665. – №. 1. – С. 012006

10. Kofanov Y. N., Sotnikova S. Y., Subbotin S. A. Method of increasing the reliability of on-board electronic equipment with an analysis of reserves for the electrical, thermal and mechanical loads //2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS). – IEEE, 2016. – С. 94-98

11. Кофанов, Ю. Н., et al. "Автоматизированная система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлектронных средствах с учетом внешних воздействий." (2013).

12. Кофанов, Ю. Н., Н. В. Малютин, and С. С. Коломейцев. "Реализация CALS-технологий для проектирования сложной радиоэлектронной аппаратуры [Электронный ресурс]." Электрон. текстовые дан. и граф. дан.– Режим доступа: <http://systech.miem.edu.ru> 4 (2006).

13. Увайсов, С. У., and Ю. Н. Кофанов. "Методика выявления скрытых дефектов интегральных схем и аппаратуры." Надежность и контроль качества. Ежемесячное приложение к журналу "Стандарты и качество" 11 (2013): 19-31.

14. Кофанов, Ю. Н., et al. "Обеспечение надежности и качества радиоэлектронной аппаратуры с помощью средств распределенного управления инновационными наукоемкими проектами." Надежность 3 (2005): 26-32.

15. 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.

16. 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.

17. Электроизоляционные компаунды. – М., 1969. – 15 с.

18. Zee H. Epoxy resins / H. Zee, K. Neville. – New York, 1967. – 922 p.
19. Экспериментальное исследование механической прочности и напряжений в эпоксидной изоляции высоковольтных элементов / М. И. Анелес, Ю. С. Первушин и др. // Труды ЛИАП. – 1967. – Вып. 52. – С. 95–99.
20. Галушко А. И. Определение внутренних напряжений и физико-механических свойств некоторых компаундов / А. И. Галушко, Л. Ф. Чувиллина // Обмен опытом в радиопромышленности, 1968. – № 6.
21. Влияние толщины защитных покрытий и их эластичности на механические напряжения в полупроводниковом кристалле / Б. С. Кудрявцев и др. // Электронная техника. Материалы, 1969, вып. 2. – С. 86–88.
22. Royzman, V., et al. "Calculation of mechanical stresses in adjoint system of electronic component and compound and strength assessment." *Journal of Vibroengineering* 15.1 (2013): 65-71
23. Goroshko, A. V., et al. "Methods for testing and optimizing composite ceramics-compound joints by solving inverse problems of mechanics." *Journal of Vibroengineering* 16.5 (2014): 2178-2187.
24. Alekseeva, E. I., et al. "Silicone compounds and sealants and their application in various branches of industry." *Polymer Science Series D* 3.4 (2010): 244-248.
25. Chukhlanov, V. Yu, and E. N. Tereshina. "Polyorganosiloxane-based heat-resistant sealant with improved dielectric characteristics." *Polymer Science Series C* 49.3 (2007): 288-291.
26. Scheuermann, Uwe. "Reliability challenges of automotive power electronics." *Microelectronics Reliability* 49.9-11 (2009): 1319-1325.
27. Wang, Huai, et al. "Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 2.1 (2013): 97-114.
28. Knoerr, Matthias, and Andreas Schletz. "Power semiconductor joining through sintering of silver nanoparticles: Evaluation of influence of parameters

time, temperature and pressure on density, strength and reliability." 2010 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. IEEE, 2010.

29. Blaabjerg, Frede, and Ke Ma. "Future on power electronics for wind turbine systems." IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics 1.3 (2013): 139-152.

30. Yang, Shaoyong, et al. "Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review." IEEE Transactions on Power Electronics 25.11 (2010): 2734-2752.

31. Amano, H., et al. "The 2018 GaN power electronics roadmap." Journal of Physics D: Applied Physics 51.16 (2018): 163001.

32. Yang, Yongheng, et al. "Design for reliability of power electronic systems." Power electronics handbook. Butterworth-Heinemann, 2018. 1423-1440

33. Шнайдер, А. Д., and А. В. Лысенко. "Влияние усталостной прочности на конструкцию РЭС." Труды международного симпозиума Надежность и качество 1 (2019): 277-280

34. Найденкин, Е. В., И. П. Мишин, and И. В. Раточка. Ультрамелкозернистые титановые сплавы с высокой статической и усталостной прочностью для авиакосмической промышленности. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и покрытий. 2019.

35. Ройзман, В. П., and Е. В. Коробко. "Проблемы вибрационной и ударной прочности изделий электронной техники." Вібрації в техніці та технологіях 2 (2011): 97-100.

36. Тумковский, С. Р., Увайсов, С. У., Иванов, И. А., & Увайсов, Р. И. (2007). Виброакустический контроль бортовой космической аппаратуры. *Мир измерений*, (12), 4-7

37. Эдвабник, В. Г. (2014). Об эквивалентности испытаний бортовой электронной аппаратуры на воздействие гармонической и широкополосной случайной вибрации. Интерэкспо Гео-Сибирь, 5(2).

38. Семенцов, С. Г., Гриднев, В. Н., & Сергеева, Н. А. (2016). Исследование влияния температурных режимов на надежность электронной аппаратуры тепловизионными методами. Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2.

39. Погалов, А. И., Блинов, Г. А., & Чугунов, Е. Ю. (2010). Термомеханическая прочность материалов многокристалльных микромодулей. Оборонный комплекс-научно-техническому прогрессу России, (4), 34-38.

40. Талицкий, Е. Н. (2006). Механические воздействия и защита электронной аппаратуры: учебное пособие: в 3 ч. Ч. 3.

41. Лышов, С. М., Иванов, И. А., & Увайсов, С. У. (2013). Средства компьютерного моделирования механических процессов в электронной аппаратуре. Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2.

42. Тумковский, С. Р., Увайсов, С. У., Инжеллиден, С. Б., & Увайсов, Р. И. (2007). Виброакустический метод диагностирования бортовой электронной аппаратуры на стадиях жизненного цикла. Качество. Инновации. Образование, (9), 51-55.

43. Покровский, В. Г. (2012). Информационные технологии в проектировании несущих конструкций электронной аппаратуры на основе эволюционных дискретных моделей. XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс, (5), 198-204.

44. Герасимов, О.Н., Доросинский, А.Ю. Березин, М. Н. Исследование влияния воздействия вибрационных нагрузок на конструкционные материалы изделий электронной техники. Надежность и качество сложных систем, 2017, 3 (19).

45. Баррет Ч.С. Структура металлом / Ч.С. Баррет. – М. : Металлургиздат, 1948. – 678 с.

46. Роздзял П. Технология полимеризации элементов РЕА / П. Роздзял ; пер. пол. – М. : Радио и связь, 1981. – 304 с.
47. Юрков Л. Ф. Переходные стекла и спаи в электровакуумной промышленности / Л. Ф. Юрков, В. К. Лeko. – М. : Энергия, 1979. – 125 с.
48. Использование ЭВМ при исследовании надежности и прочности элементов радиоэлектронной аппаратуры / И. А. Антипов, В. П. Ройзман, М. И. Хавкин, А. Г. Шайко-Шайковский // Теоретическая электротехника и электроника – К., 1979. – 53 с.
49. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1974. – 831 с.
50. Чижевский К. Г. Расчет круглых и кольцевых пластин / К. Г. Чижевский. – Л. : Машиностроение, 1977. – С. 142–146.
51. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Р. М. Шнейдерович. – М. : Машгиз, 1959. – 459 с.
52. Умергалина, Т. В., & Якупов, В. М. (2018). Приложение теории аналитических функций и операционного исчисления.
53. Давыдов, Е. Г. "Уравнения математической физики." (2017): 144
54. Динник А. Н. Избранные труды : в 2 т. Т. 2: Приложение функций Бесселя к задачам теории упругости / А. Н. Динник. – К. : Изд-во АН УССР, 1959. – 224 с.
55. Бидерман Б. Л. Механика тонкостенных конструкций / Б. Л. Бидерман. – М. : Машиностроение, 1977. – 487 с.
56. Рехсон С. Г. Влияние скорости охлаждения на напряжения в спаях / С. Г. Рехсон, В. А. Гинзбург, О. В. Мазурин // Электронная техника. Материалы. – 1973. – Вып. 9. – С. 74–81.

ДОДАТКИ

Додаток А. Матеріали презентації результатів виконання дипломної роботи

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра телекомунікацій і радіотехніки



*** ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ
МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НА МІННІСТВ
ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОННОЇ
АПАРАТУРИ**

ДИПЛОМНА РОБОТА
Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Виконав: ст. гр. ТРм-1 Гонтар В.О.
Керівник: канд. техн. наук, доц. Макаришкін Д.А.

1

* СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ



Питання міцності РЕА
досліджували: Ройзман В.П.,
Петрашук С.А., Ковтун І.І.,
Alexander Roth, Zirnheld J., John
Frederik Lancaster, Кофанов
Ю.М., Стрельбицкий В. В.

Рис. 1 - Об'єкти досліджень

- Негативні фактори, що спричиняють руйнування:
- значний розкид фізико-механічних характеристик сполучних матеріалів;
 - вплив перепаду температури;
 - вплив внутрішнього і зовнішнього тиску

Загальна проблема, на вирішення якої спрямовано дипломну роботу, є підвищення надійності виробів РЕА.

* **Мета роботи** підвищення міцнісної надійності виробів електроніки, що мають циліндричну форму, на прикладі резисторів, фоторезисторів та конденсаторів, за рахунок розробки і удосконалення теоретико-експериментальних методів розрахунку на міцність.

Об'єктом дослідження є міцнісна надійність виробів електроніки

Предмет дослідження - розрахунково-експериментальні методи досліджень міцності виробів електроніки, що мають циліндричну форму.

* Задачі дослідження:

1. Розробити математичну модель для розрахунку контактного тиску у металоскляних конструкціях деталей РЕА, що мають форму тіла обертання для оцінювання міцності конструкції за різних умов впливу зовнішніх і внутрішніх контактних тисків.
2. Розробити математичну модель, що описує зміни перепаду температури по радіусу елемента РЕА з вісесиметричною формою при довільних законах розподілу температури по радіусу виробу.
3. Удосконалити математичну модель, що описує контактні тиски і напруження, застосовувавши схему тришарових циліндрів, при одночасній дії тиску і температури.
4. Розробити методику визначення:
 - допустимого розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів, що використовуються при виготовленні РЕА;
 - температурних напружень у РЕА при довільних законах розподілу температури.
 - закону розподілу температури для круглої скляної пластини при склоспаюванні на індукційних установках,
 - визначення сумарних залишкових напружень в вузлах елементів РЕА
5. Побудувати математичну модель для визначення напруженого стану конструкції дискового конденсатора при термоциклюванні.

* 4. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕА

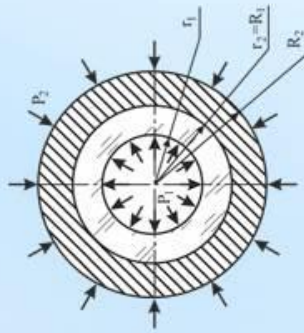


Рис. 1 - Розрахункова схема типового вузла РЕА

Для рівноваги нескінченно малого елемента циліндра, утвореного двома поперечними площинами з відстанню dz між ними, двома осьовими площинами, з кутом $d\varphi$ між ними і двома циліндрами радіусів R і $(R + dR)$, маємо формул Ляме:

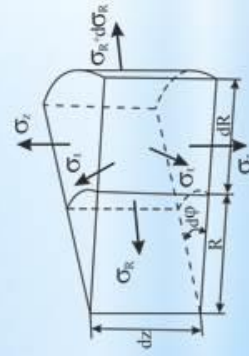


Рис. 2.4 - Рівновага нескінченно малого елемента

Контактні тиск і напруження

$$U_M = \frac{1-2\mu_M}{E_M} \cdot \frac{R_1^2 q - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2} R + \frac{1+\mu_M}{E_M} \cdot \frac{R_1^2 R_2^2 (q - P_2)}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{R} \quad \sigma_z = \frac{qR_1^2 - P_2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2}$$

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

* 4. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕА

Задаючи у наступних виразах закони зміни перепадів температури $T(r)$; $T(R)$, можна визначити напруження в будь-якій точці виробу.

$$\sigma_r = (r_2^2 - r_1^2)^{-1} (r_1^2 P_1 - r_2^2 p) - (r_2^2 - r_1^2)^{-1} (r_1^2 r_2^2 (P_1 - p)) \cdot r^{-2} + \\ + -r^2 E_c (1 - \mu_c)^{-1} \left[\int_{r_1}^r \alpha_c T(r) r dr - (r^2 + r_1^2) (r_2^2 - r_1^2)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_c T(r) r dr \right],$$

$$\sigma_t = r_1^2 (r_2^2 - r_1^2)^{-1} ((P_1 - r_2^2 p) + r_2^2 (P_1 - p) r^{-2}) + \\ + E_c (1 - \mu_c) r^{-2} \left[\int_{r_1}^r \alpha_c T(r) r dr + (r_1^2 + r^2) (r_2^2 - r_1^2)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_c T(r) r dr - \alpha_c T(r) \right],$$

$$\sigma_z = \frac{P_1 r_1^2 - p r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - E_c \left[\alpha_c T(r) - 2 (r_1^2 - r_2^2)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_c T(r) r dr \right] (\mu_c - 1).$$

Радіальні і окружні напруження у внутрішньому циліндрі радіоелемента

*** 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ КОМПАУНДОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕА**

Контактний тиск і напруження в елементах РЕА, що приводяться до схеми тришарових циліндрів при одночасній дії тиску і температури. Такими елементами є керамічні резистори, залиті шаром компаунду

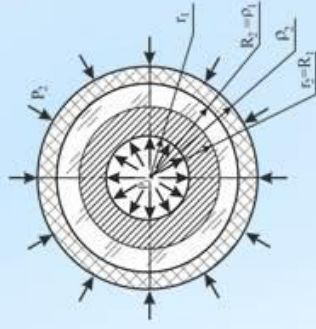


Рис. 2.5 - Перерізи елементів РЕА, що зводяться до схеми «тришарового» циліндра

Зовнішні і внутрішні контактні тиски для внутрішнього циліндра

$$\begin{aligned} \sigma_r &= (r_2^2 p - r_1^2 P_1)(r_1^2 - r_2^2)^{-1} + (r_1^2 r_2^2 r^{-2}(P_1 - p))(r_1^2 - r_2^2)^{-1} + \\ &+ E_m r^{-2} (\mu_m - 1)^{-1} \left[\int_{r_1}^r \alpha_m T(r) r dr + (r^2 + r_1^2)(r_1^2 - r_2^2)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_m T(r) r dr \right] \\ \sigma_t &= (r_1^2 - r_2^2)^{-1} (r_2^2 p - r_1^2 P) + r^{-2} r_1^2 r_2^2 (p - P)(r_1^2 - r_2^2) + \\ &+ E_c r^{-2} (\mu_c - 1)^{-1} \left[\alpha_m T(r) - \int_{r_1}^r \alpha_m T(r) r dr + (r_1^2 + r^2)(r_1^2 - r_2^2)^{-1} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_m T(r) r dr \right] \\ \sigma_z &= (r_2^2 - r_1^2)^{-1} (P_1 r_1^2 - p r_2^2) + E_m (\mu_m - 1)^{-1} \left[\alpha_m T(r) + \frac{2}{r_1^2 - r_2^2} \int_{r_1}^{r_2} \alpha_m T(r) r dr \right]. \end{aligned}$$

* 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ КОМПАНДОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕА

Зовнішні і внутрішні контактні тиски для середнього циліндра

$$\sigma_R = (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \left[R^{-2} R_1^2 R_2^2 (P - p) - (R_2^2 P - R_1^2 p) \right] + E_c R^{-2} (\mu_c - 1)^{-1} \left[\int_{R_1}^R \alpha_c T(R) R dR + (R_1^2 - R_2^2) (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_c T(R) R dR \right],$$

$$\sigma_t = (R_1^2 - R_2^2)^{-1} \left[R_2^2 P - R_1^2 p + R^{-2} R_1^2 R_2^2 (P - p) \right] + E_c R^{-2} (\mu_c - 1)^{-1} \left[- \int_{R_1}^R \alpha_c T(R) R dR + (R_1^2 + R_2^2) (R_1^2 - R_2^2)^{-1} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_c T(R) R dR + \alpha_c T(R) \right],$$

$$\sigma_z = (PR_2^2 - pR_1^2) (R_1^2 - R_2^2) - E_c (1 - \mu_c) \left[-2 (R_1^2 - R_2^2)^{-1} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_c T(R) R dR - \alpha_c T(R) \right].$$

Зовнішні і внутрішні контактні тиски для зовнішнього циліндра

$$\sigma_R = (\rho_1^2 P_2 - \rho_1^2 p) (\rho_1^2 - \rho_2^2)^{-1} + \rho^{-2} \rho_1^2 \rho_2^2 (P - P_2) (\rho_1^2 - \rho_2^2)^{-1} + \sigma_t = (\rho_1^2 - \rho_2^2)^{-1} \left[(\rho_2^2 P_2 - \rho_1^2 P) + \rho^{-2} \rho_1^2 \rho_2^2 (P - P_2) \right] + E_c (\mu_c - 1) \rho^{-2} \left[\alpha_c T(\rho) - \int_{\rho}^{\rho_1} \alpha_c T(\rho) \rho d\rho - (\rho_1^2 + \rho^2) (\rho_2^2 - \rho_1^2)^{-1} \int_{\rho}^{\rho_1} \alpha_c T(\rho) \rho d\rho \right],$$

$$\sigma_z = (P_2 \rho_2^2 - P \rho_1^2) (\rho_1^2 - \rho_2^2) + E_c (\mu_c - 1) \left[\alpha_c T(\rho) + 2 (\rho_1^2 - \rho_2^2)^{-1} \int_{\rho}^{\rho_1} \alpha_c T(\rho) \rho d\rho \right]$$

* 4. РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ РЕА

Розроблено методики:

визначення допустимого розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів, що використовуються при виготовленні РЕА

визначення температурних напружень у вільних і затиснених пластинах РЕА при довільних законах розподілу температури по радіусу

розрахунку закону розподілу температури для круглої скляної пластини при склоспаюванні на індукційних установках

визначення сумарних залишкових (і від надлишкового тиску) напружень в вузлах елементів РЕА

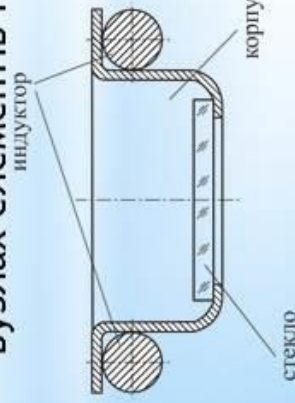


Рис. 1 - Схема індукційного вузла, в якому відбувається склоспай

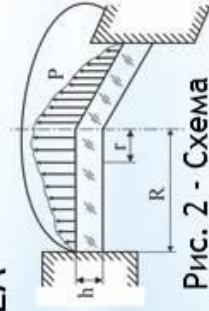


Рис. 2 - Схема вікончатого спаяний фотодатчика, що зазнає перепад тиску

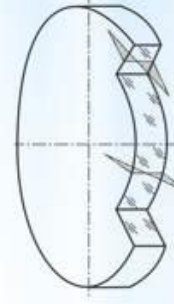


Рис. 3 - Епюри розподілу окружних і радіальних нормальних напружень по товщині пластини



Рис. 4 - Позитивний напрямок згинальних моментів

* **Наукова новизна отриманих результатів**

1. *Удосконалено математичну модель визначення контактного тиску (напружень) металоскляних конструкцій деталей РЕА, що мають форму тіла обертання (фоторезистори та ін.), що дало змогу оцінювати міцність конструкції за різних умов впливу зовнішніх і внутрішніх контактних тисків.*
2. *Встановлено залежність, що описує сім'ю статичних законів зміни перепаду температури по радіусу елемента РЕА, що мають вісесиметричну форму, що дало змогу визначати напруження при довільних законах розподілу температури по радіусу виробу.*
3. *Удосконалено математичну модель, яка описує контактні тиски і напруження, що дало змогу оцінювати міцність в елементах РЕА, що приводяться до схеми тришарових циліндрів, при одночасній дії тиску і температури.*

* Практичне значення отриманих результатів

1. Розроблено практичні методики визначення:

- допустимого розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів, що використовуються при виготовленні РЕА, що полягає у розв'язанні задачі багатокритеріальної оптимізації;
- температурних напружень у вільних і затиснених пластинах РЕА при довільних законах розподілу температури по радіусу елемента.
- закону розподілу температури для круглій скляної пластини при склоспаюванні на індукційних установках, що дає можливість знаючи закон зміни температури по радіусу круглій скляної пластини, визначити контактний тиск, окружне, радіальне і осьове напруження.

2. Запропонована методика визначення сумарних залишкових (і від надлишкового тиску) напружень в вузлах елементів РЕА дає можливість оцінювати міцність конструкції.

Результати роботи можуть бути використані на етапі проектування елементів конструкції РЕА з конструкцією осесиметричної форми (резисторів, діодів, транзисторів, фото резисторів), герметизованих компаундом, а також під час навчання студентів галузі знань «Електроніка та телекомунікації» питанням конструювання і технології виробництва РЕА.

Практична значимість отриманих результатів полягає у економічному ефекті внаслідок підвищення міцнісної надійності циліндричних герметизованих елементів виробів РЕА.

* ВИСНОВКИ

1. Для металоскляних конструкцій деталей РЕА, що мають форму тіла обертання (фоторезистори та ін.), удосконалено математичну модель визначення контактного тиску (напружень), що дало змогу оцінювати міцність конструкції за різних умов впливу зовнішніх і внутрішніх контактних тисків.
2. Обґрунтовано математичну модель, що описує сім'ю статичних законів зміни перепаду температури по радіусу елемента РЕА, що мають вісесиметричну форму, що дало змогу визначити напруження при довільних законах розподілу температури по радіусу виробу.
- 3.3. Встановлені залежності тисків і напружень у досліджуваних конструкціях електронних елементів дали змогу зробити висновки про характер зміни величини напружень по радіусу елемента. Побудовано епюри тисків і напружень у досліджуваних конструкціях електронних елементів, що дало змогу визначити місце розташування найнапруженішої точки матеріалу, дати висновок про найбільш прийнятні (з точки зору міцності) закони розподілу температури по радіусу елемента.
4. Розроблено практичну методику визначення допустимого розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів, що використовуються при виготовленні РЕА, що полягає у розв'язанні задачі багатокритеріальної оптимізації.
5. Розроблено практичну методику визначення температурних напружень у вільних і затиснених пластинах РЕА при довільних законах розподілу температури по радіусу елемента.
6. Розроблено практичну методику визначення закону розподілу температури для круглої скляної пластини при склоспаюванні на індукційних установках, що дає можливість знаючи закон зміни температури по радіусу круглої скляної пластини, визначити контактний тиск, окружне, радіальне і осьове напруження.
7. Запропоновано методику визначення сумарних залишкових (і від надлишкового тиску) напружень в вузлах елементів РЕА

* ДЯКУЮ ЗА УВАГУ !

УДК 621.37

РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ РЕА ВІСЕСИМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ

Гонтар В.О., Макаришин Д.А., Горошко А.В., Медзатий Д.М.
Хмельницький національний університет, Україна

Постановка проблеми. Тенденція до зниження масогабаритних характеристик, отримання 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 виробках виникають напруження, від дії яких відбувається відхилення їх параметрів за межі технічних умов, що часто призводить до відмов ще задовго до поломки [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 властивостям 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].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі механічної надійності та міцності елементів РЕА присвячено чимало наукових робіт. Так, автори роботи [3] наводять результати досліджень високовольтних резисторів з покриттям епоксидним герметиком, що застосовуються у імпульсних системах живлення, таких як електрориводи, 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 питаннями 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 шодо нескладні інженерні розрахунки, які використовують достовірні характеристики досліджуваних виробів і легко перевіряються за допомогою експериментів.

Мета роботи полягала у розробці розрахункових методів оцінювання міцності віссиметричних 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

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

Розглянемо переріз вузла виводу через «будинковий» склоспай. Скляний циліндр (середній) знаходиться під дією контактного тиску з боку оточуючих його металевих частин. В інших випадках, як наприклад, в діодах можна вважати, що стінки циліндра знаходяться під дією контактного 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. Таким чином, для всіх випадків слід розглянути розрахунок тіла обертання, що знаходиться під дією контактних тисків по обидва боки.

Нехай в 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). Хоча природа утворення сил в кожному випадку індивідуальна, рівняння рівноваги віссиметричного тіла будуть однакові для всіх випадків, в

тому числі і для розглянутих тут випадків з'єднання різновідних матеріалів в типових вузлах елементів РЕА. У тих випадках, коли можна задовольнятися точністю розрахунків 5-6%, циліндр з відношенням $R_2 / r_2 > 4$ можна розглядати таким, що має нескінченно товсту стінку, при цьому величина контактної тиску q зростає, асимптотично наближаючись до деякого значення. Отже, в інженерних розрахунках можна розглядати охоплену деталь як циліндр з нескінченно великим радіусом.

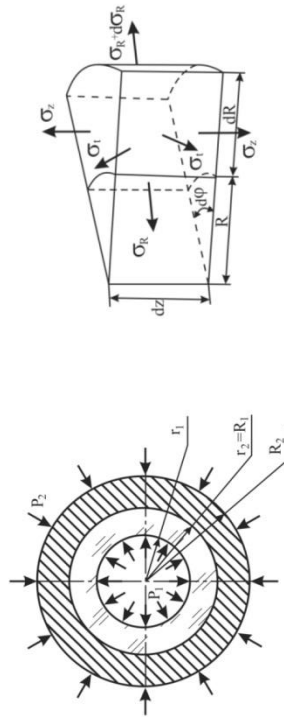


Рис. 2. Розрахункова схема Рис. 3. Рівновага нескінченно типового вузла РЕА малого елемента

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

- для зовнішнього металевого циліндра

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

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

- для внутрішнього скляного циліндра

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

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

де σ_R – радіальне напруження; σ_t – окружне (тангенціальне) напруження; σ_z – осьове напруження; U_M – радіальне переміщення зовнішнього металевого 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 металевієї навколишньої частини:

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

$$\sigma_t = \frac{R_1^2 q}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{R_1^2 R_2^2 q}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{R^2}.$$

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 $R = R_1$:

$$\sigma_R = -q, \quad \sigma_t = \frac{q(R_1^2 + R_2^2)}{R_2^2 - R_1^2}, \quad U_M = \frac{R_1 q}{E_m} \left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} + \mu_m \right). \quad (6)$$

У зовнішній поверхні зовнішнього циліндра, при:

$$\sigma_R = 0, \quad \sigma_t = \frac{2R_1^2 q}{R_1^2 - R_1^2}, \quad U_M = \frac{R_2 \cdot R_1^2 \cdot q}{R_2^2 - R_1^2} \cdot E_m. \quad (7)$$

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

$$U_c = \frac{r_1^2 P_1 (1 - \mu_c) - 2r_1 r_2^2 q + r_1 r_2^2 P_1 (1 + \mu_c)}{E_c (r_2^2 - r_1^2)}, \quad \sigma_r = -P_1, \quad \sigma_t = \frac{P_1 (r_2^2 - r_1^2) - 2r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2}. \quad (8)$$

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

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

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 металевієї навколишньої частини:

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. У випадку, коли 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 //Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005.- С. 6-12
2. Механика в электронике. Монография: [в 3 т.] Т. 1: Статическая прочность / Ройзман В. П. - Хмельницький : ХНУ – 2015. - 313 с.
3. Zirnheld J. et al. Evaluation of epoxy coated resistors in high voltage DC surge environments //2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). – IEEE, 2016. – С. 715-717
4. Kokatev A. N. et al. Monitoring of properties of epoxy molding compounds used in electronics for protection and hermetic sealing of microcircuits //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 665. – №. 1. – С. 012006
5. Kofanov Y. N., Sotnikova S. Y., Subbotin S. A. Method of increasing the reliability of on-board electronic equipment with an analysis of reserves for the electrical, thermal and mechanical loads //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. Petraschuk, I. Kovtun, O. Repyuk // Visnyk Universytetu «Ukraina», Informatics, Computer Science and Cybernetics. – 2019. – № 2 (23). – Р. 142-150.
7. Спротивлявленіє матеріалів / Г. С. Писаренко, В. А. Агарєєв, А. Л. Билета, В. Г. Попков, Э. С. Уманский. – К.: Техніка. 1987. – 793 с.

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

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

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 охолодженого циліндра ($R = R_1$):

$$U_M = \frac{R_1^2 q (1 - \mu_M) - 2R_1 R_2^2 P_2 + R_1 R_2^2 q (1 + \mu_M)}{E_M (R_2^2 - R_1^2)}, \quad \sigma_R = -q, \quad \sigma_t = \frac{q(R_2^2 + R_1^2) - 2R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2}; \quad (10)$$

$$\text{при } R = R_2$$

$$U_M = \frac{R_2 P_2 (1 - \mu_M)}{E_M}, \quad \sigma_R = -P_2, \quad \sigma_t = \frac{2R_1^2 q - P_2 (R_2^2 + R_1^2)}{R_2^2 - R_1^2}. \quad (11)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

Завідувачу кафедри телекомунікацій та
радіотехніки
д.т.н., професору Бойку Ю.М.
здобувача вищої освіти
Гонтара В.О.
ФПКТС, гр. ТРМ-19-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

23 листопада 2020 р.
дата


підпис

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 3.0%

Словари проверки: en_US, ru_RU, ua_UA. Ошибок в документах: 10%

ID: 83796 Назва: Теоретико-експериментальні методи розрахунку на мішність елементів електронної апаратури Додано в БД: 2020-12-10 Автор: Гонтар Віталій Олександрович Руководитель: Макаршин Денис Анатолійович Консультант: Опоненты: Мартинюк Валерій Володимирович	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	95952	1424	4889 (5%)	75 (5%)

Источники плагиата		Наличие плагиата в документе	
ID	Описание	Символы	Лексемы



Ім'я користувача:
Kafedra telekom_radiotechniki

ID перевірки:
1005456017

Дата перевірки:
14.12.2020 19:35:10 EET

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
14.12.2020 20:55:08 EET

ID користувача:
100005656

Назва документа: Гонтар В.О._ТРМ-19-1_

Кількість сторінок: 100 Кількість слів: 16656 Кількість символів: 111894 Розмір файлу: 4.37 MB ID файлу: 1005745959

18.9% Схожість

Найбільша схожість: 7.87% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1005636136)

18.6% Джерела з Інтернету

742

Сторінка 102

8.27% Джерела з Бібліотеки

5

Сторінка 116

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

50.4% Вилучень

Деякі джерела вилучено автоматично (фільтри вилучення: кількість знайдених слів є меншою за 8 слів та 0%)

2.55% Вилучення з Інтернету

172

Сторінка 117

49% Вилученого тексту з Бібліотеки

49

Сторінка 119

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

55

РІШЕННЯ КАФЕДРИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ТА РАДІОТЕХНІКИ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Теоретико-експериментальні методи розрахунку на міцність елементів електронної апаратури

Автор: Гонтар Віталій Олександрович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: к.т.н., доцент Макаришкін Денис Анатолійович

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	-
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	відповідає
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	-
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	-
5	Інше:	-

Підтвердження: Запозичення у розмірі 18.9%, виявлені в роботі відповідають тексту стандартних бланків та списку літератури, решта запозичень є випадковими, або на них є посилання, тому ці запозичення не є плагіатом, бо вони не стосуються наукової новизни і практичної значущості роботи.

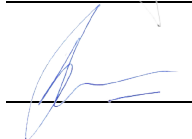
«14» грудня 2020 р.

Науковий керівник



Макаришкін Д.А.

Завідувач кафедрою ТР



Бойко Ю.М.

РЕЦЕНЗІЯ

на дипломну роботу ст. гр. ТРМ-19-1 Гонтара Віталія Олександровича
«ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ
НА МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ»,
другий освітній рівень (магістр), спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Тема дипломної роботи Гонтара В.О. відповідає спеціальності, а зміст роботи – затвердженій темі та технічному завданню. Схвально, що у роботі використаний міждисциплінарний підхід, який полягає у широкому застосуванні методів оцінювання міцності і фізико-механічних характеристик, що безпосередньо стосується надійності РЕА. У роботі здійснена спроба узагальнити напрацювання вчених наукової школи проф. Ройзмана, що діє у Хмельницькому національному університеті, і удосконалити їх результати, отримавши нові наукові знання і практичні результати.

Актуальність. Проблема міцності радіотехнічної і телекомунікаційної апаратури є завжди актуальною. Оскільки умови експлуатації сучасних електронних систем стають все жорсткішими: збільшуються перепади атмосферного тиску (літаки, дрони), збільшуються статичні і динамічні силові навантаження (рухомі мобільні об'єкти), методи розрахунку на міцність елементів такої апаратури потребують удосконалення. Слід зауважити, що традиційно склалося, що під час проектування електронної апаратури більшість уваги приділялось радіотехнічній надійності елементів. Між тим значна кількість елементів, зокрема компаундованих, виходить з ладу через механічні поломки. Руйнування їх конструкції викликано тисками і напруженнями, що виникають на контакті різнорідних матеріалів, що є складовими конструкції.

Стиль викладення матеріалу. Результати, одержані автором, викладені послідовно і добре обґрунтовані. Робота містить достатньо повну інформацію щодо методів досліджень, а тому дає змогу легко оцінити достовірність і правильність проведених розрахунків.

Наукова новизна. У роботу увійшли результати, отримані під час виконання наукової роботи разом з вченими (Ройзман В.П., Ковтун І.І., Петрашук С.А.). Автор особисто, а також у колективі дослідників отримав наукові результати, які складають наукову цінність у галузі телекомунікацій і радіотехніки, оскільки стосуються оцінювання міцності електронних виробів, а також практичні методики розрахунку.

Практична цінність. Цінність викладених у роботі результатів для практики полягає у практичному застосуванні розроблених методів і методик для едослідження механічних напружень у виробах РЕА, оцінюванні їх міцності і практичних рекомендацій щодо проектування і їх виготовлення для отримання РЕА з вищими показниками міцнісної надійності.

Недоліки. На жаль, автор не навів дані щодо практичного впровадження своїх досліджень на сучасних підприємствах. Очевидно, що такі впровадження мали б значний економічний ефект. В кінці роботи бажано було б подати узагальнюючі рекомендації щодо елементів РЕА, для яких будуть справедливі результати, отримані в роботі, оскільки технології виробництва дуже стрімко змінюються і набувають нових форм.

Мало уваги приділено експериментальній частині роботи. Окрім того, бажано було б надати більше рисунків і таблиць з результатами розрахунків.

Висновки. Тема роботи є актуальною і сучасною, а рівень використання сучасних технологій у дослідженнях – задовільним. Тема роботи у достатній мірі розкрита. Задачі дослідження виконані, а висновки відповідають пунктам задач. В цілому робота свідчить про достатній рівень загальнотеоретичної і практичної підготовки її автора. Вважаю, що робота відповідає всім вимогам, які ставляться до кваліфікаційних робіт другого освітнього рівня (магістр) спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка і вона заслуговує оцінки «добре».

Доцент кафедри

телекомунікацій та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Хмельницького національного університету,

канд. техн. наук, доц.



Корецька Л.О.