УДК 531./534:621.38

В.П. РОЙЗМАН, А.Г. ВОЗНЯК
Хмельницький національний університет

ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ МІЦНОСТІ І ГЕРМЕТИЧНОСТІ КОМПАУНДОВАНИХ ВИРОБІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

В роботі дається огляд сучасного стану проблем механічної міцності і герметичності компаундованих виробів радіоелектронної апаратури. Звертається увага на недостатнє вивчення механічних властивостей нових матеріалів, які застосовуються в радіотехніці, а також на великий розкид їх значень. Внаслідок великої відмінності фізико механічних характеристик матеріалів, що контактують між собою, можуть виникати великі внутрішні напруження, які можуть призвести до розгерметизації та розтріскування. Також звертається увага на відсутність розрахунків і вимірювань виникаючих термічних напружень.

Ключові слова: компаунд, конструкція, конденсатор, радіоелектронна апаратура, герметизація, напруження, міцність.

V.P. ROYZMAN, A.G. VOZNYAK
Khmelnytskiy National University

REVIEW PROBLEM STRENGTH AND TIGHTNESS COMPOUNDING ELECTRONIC DEVICES

Abstract – This paper provides an overview of the current state of problems of mechanical strength and tightness compaund electronics products. Insufficient attention is paid to the study of the mechanical properties of new materials used in the radio and on the large spread their values. Due to large differences of physical mechanical properties of materials in contact with each other, may have large internal stresses that can cause cracking and depressurization.

Attention is drawn to the absence of calculations and measurements occurring thermal stresses.

Keywords: compound, construction, capacitor, electronic equipment, pressurization, tension, strength.

Під час аналізу причин відмов радіоелектронної апаратури, традиційно вважається, що 40–45% відмов в експлуатації відбуваються через помилки, які допускаються на етапі проектування, 20% обумовлюється недосконалістю технологічних процесів виготовлення, а також недостатнім рівнем технологічної дисципліни, 30% викликано неправильними режимами експлуатації і порушенням правил технічного обслуговування і 5–7% – від зношування складових частин і старіння матеріалів. Проте у наведеній класифікації не враховано взаємозв'язок, наприклад, конструкторських і технологічних причин відмов. Рішення ж проблем забезпечення якості вимагає не тільки врахування всіх етапів виготовлення: проектування, виготовлення, доведення і експлуатації, але і взаємного впливу цих етапів. Нехтування цим принципом веде до зниження якості. Так, на практиці досить часто недостатня надійність самих технологічних процесів виготовлення буває обумовлена недостатнім рівнем виробничої технологічності їх конструкції та застосованої елементної бази. Більше того, проекти деяких систем, в основі яких були закладені прогресивні принципи їх дії, залишилися нереалізованими лише тому, що виявилися недостатньо технологічними, занадто трудомісткими, непридатними з точки зору виготовлення.

Аналіз сучасних виробів РЕА та їх елементної бази свідчить про те, що найбільш загальною тенденцією в розвитку радіоелектронної техніки є об'єднання все більшої інтеграції виконуючих функцій з все більшою її мікромініатюризацією. Наслідком цього є різке ускладнення конструкцій сучасних виробів і технологічних процесів їх виготовлення. Так технологія виготовлення сучасних мікросхем практично не допускає коригування їх структури і параметрів в процесі виготовлення, простіше створити нову мікросхему, ніж скоригувати вже виготовлену. Це різко зменшує можливість експериментального доведення (налагодження та оптимізації) і, відповідно, вимагає своєчасного вирішення основних питань технологічності конструкції і питань підвищення надійності технологічних процесів їх виготовлення з одночасним підвищенням точності проведених при цьому теоретичних розрахунків. Аналіз конструкторських особливостей сучасних виробів РЕА показує, що вирішення завдань забезпечення захисту від вологи і стійкості при зміні температури і тиску навколишнього середовища призвело до використання в конструкціях нових матеріалів з недостатньо вивченими властивостями і об'єднанню різнорідних матеріалів. Механічна взаємодія, що виникає в таких конструкціях, може істотно вплинути як на протікання основних електричних процесів, так і на працездатність виробу в цілому. Проте, в даний час, роботи з проектування РЕА часто проводяться лише у виключно радіотехнічному напрямку, без необхідних розрахунків на міцність, без вимірювання напружень і оцінки напруженого стану конструкцій в цілому і їх окремих елементів. В той же час сучасні вимоги і майбутнє радіоелектроніки, а також сфери її використання, висувають в один ряд з виключно радіоелектронними завданнями проблему забезпечення механічної міцності і надійності.

Конструкторські особливості сучасних РЕА обумовлюють необхідність спеціального вивчення питань їх міцності і герметичності, яким зараз приділяють недостатньо уваги. Справа в тому, що в процесі проектування і доведення РЕА дуже часто розглядаються лише їх електричні параметри. Що ж стосується конструкції герметизованих РЕА, то тут основну увагу потрібно приділити волого-захисним властивостям застосованих в них полімерних матеріалів. В той же час їх механічна міцність і взаємодія зі складовими частинами конструкції можуть мати істотний вплив, як на протікання електричних процесів, так і на

працездатність пристрою в цілому. Крім того, дуже рідко при проектуванні РЕА вивчається вплив їх механічних параметрів на значення електричних характеристик.

У сучасній радіоелектронній апаратурі широко використовується герметизація деталей, вузлів і блоків термореактивними компаундами на основі синтетичних полімерних смол. Герметизація є ефективним засобом захисту від вологи, хімічно агресивних речовин та інших шкідливих впливів навколишнього середовища. Як правило, герметизація покращує електроізоляційні, механічні та інші експлуатаційні характеристики апаратури, підвищує її надійність, а також має інші переваги. В той же час герметизація має і недоліки. Наприклад, завдяки низькій теплопровідності компаундів погіршується тепловідвід, компаунд обмежує можливості ремонту, внутрішні напруження в компаундах можуть знижувати працездатність деталей або цілісність компаунда.

Відомо, що герметизація може не дати потрібного ефекту і навіть призвести до зниження надійності апаратури через розтріскування компаунда, обриву електричних ланцюгів і інших неполадок, пов'язаних з внутрішніми напруженнями. Тобто, вибір компаунда з відмінними електроізоляційними, вологозахисними і технологічними характеристиками не є гарантією надійності роботи конструкції.

Прикрі і дорогі прорахунки виникають у тих випадках, коли при виборі компаунда беруть до уваги лише його характеристики як матеріалу і не враховують взаємодію з герметизованими елементами.

Звичайно, конструкторам відомо, що герметизуючі компаунди утворюють з елементами РЕА монолітні з'єднання. Внаслідок великої відмінності у фізико-механічних характеристиках всіх елементів, які становлять таку систему, вони неминуче взаємодіють між собою. На жаль, даних про взаємодію компаунда з елементами поки що в довідниках немає.

Є декілька книг з герметизації РЕА. Наприклад, книга Ч. Харпера [1] містить в собі деякі відомості, в тому числі по внутрішнім напруженням в компаундах, проте цей матеріал викладений у стислому вигляді і далекий від досконалості.

Журнальні статті з цієї тематики дають уривчасті відомості, і на додачу використання публікацій ускладнюється відсутністю загальноприйнятої термінології і методики вимірювання внутрішніх напружень. Склалося становище, при якому характеристики радіоелектронних схем, які визначаються схемно-електричними параметрами, підлягають теоретичному аналізу і розрахунку, в той час як компаунди для герметизації обираються інтуїтивно, на основі досвіду, рекомендацій фахівців. Якщо виріб, який герметизується, витримав задані навантаження, то завдання вибору компаунда вважається вирішеним. Подальші пошуки, як правило, припиняються, хоча вимоги до фізико-механічних характеристик компаунда залишаються невивченими, і немає впевненості в тому, що обраний компаунд повністю їм відповідає. При необхідності заміни одного компаунда іншим складно визначити, які властивості повинні бути збережені або покращені, а які не мають істотного значення. При такому підході не може бути й мови про вибір оптимального компаунда.

Фізико-механічна взаємодія компаунда та елементів РЕА характеризується виникненням внутрішніх напружень.

Розглядаючи внутрішні механічні напруження, які виникають в монолітній системі, компаунд – герметизована деталь, різні автори застосовують декілька різних термінів для їх позначення. Наприклад, в іноземній технічній літературі зустрічається термін: internal stresses – внутрішнє напруження або residual stresses – залишкове напруження; interface stresses – при позначенні радіальної складового напруження на межі розділу компаунд – герметизована деталь, а також для позначення рівномірно розподіленого радіального так званого контактного тиску компаунда на деталь; shrinkage stresses – так звані усадкові напруження.

Рис. 1. Гермомодуль

В загальному випадку сучасна конструкція РЕА представляє собою гетерогенну систему з елементів РЕА і компаунда. Вони об'єднані фізико-механічними зв'язками, наприклад, силами адгезії компаунда. У такій системі затвердіння компаунда супроводжується зміною обсягу, при цьому усадкові деформації не проходять вільно.

Більшість конструкцій радіоелектронних пристроїв являють собою заполімеризований об’єм компаунда з багаточисленними включеннями у виді різнорідних елементів, плат з контактними виводами і можуть розглядатися як єдине тіло – з’єднання, складене з багатьох неоднорідних матеріалів, об’єднаних в одне ціле (рис. 1).

На етапах виробництва, зберігання і експлуатації при коливаннях температури, внаслідок відмінності фізико-механічних характеристик всіх елементів, які складають систему, має місце взаємодія компаунда з його включеннями, тобто з електронними елементами та іншими складовими конструкції, і виникають механічні напруження, від яких можуть руйнуватися найменш міцні ділянки конструкції.

Аналіз конструктивних особливостей типових резисторів і конденсаторів показує, що геометрична

форма цих пасивних радіо-електричних компонентів, як правило, має вигляд тіла обертання, багатогранників або їх сукупностей. На рис. 2–5 приведені деякі з досліджуваних виробів.

До заливки герметизуючі елементи і герметик розігрівають до температури полімеризації, при цьому вони розширюються незалежно один від одного. Після заливки герметиком виріб розміщують в термостат і витримують до кінця процесу полімеризації, в ході якого через хімічну усадку герметика вже виникають незначні по величині [2] контактні тиски і напруження. Після завершення процесу полімеризації, внаслідок відмінностей в фізико-механічних характеристик герметика и ЕРЕ, на їх межах виникають контактні тиски, котрі обумовлюють наявність напружень в матеріалах конструкції.

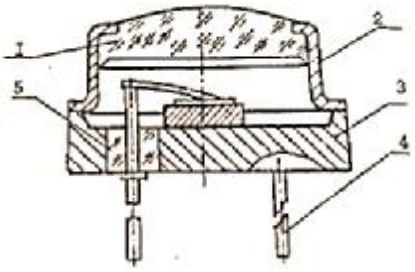

Рис. 2. Фоторезистор: 1 – скляне віконце; 2 – кришка; 3 – корпус; 4 – вивід; 5 – бусинка

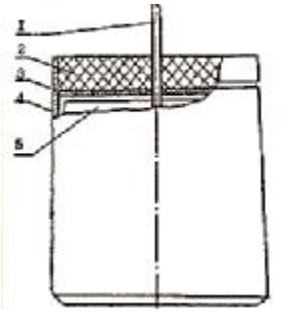

Рис. 3. Тонкоплівковий конденсатор: 1 – вивід; 2 – компаунд; 3 – прокладка; 4 – корпус;5 – секція

Основними причинами виникнення внутрішніх напружень у гетерогенній системі є зміна обсягу затверділого компаунда в порівнянні з попереднім рідким станом, і відмінність в температурних коефіцієнтах розширення матеріалів, які складають гетерогенну систему. Напруження, які виникають при цих видах деформацій, отримали назву усадкових і термічних відповідно.

Виникнення усадкових напружень пов'язано з процесом утворення зшитої структури компаунда, який супроводжується орієнтацією молекул, виникненням хімічних зв'язків і утворенням ланцюгових молекул, взаємне розташування яких відрізняється від розташування молекул мономерів. Ці процеси супроводжуються зміною міжмолекулярних відстаней. Одночасно змінюється обсяг компаунда, відбувається усадка.

По відношенню до компаунду електрорадіоелементи є чужорідними тілами, які заважають вільній зміні обсягу компаунда. На поверхні чужорідних тіл релаксаційні процеси сповільнюються, через що виникають напружені структури [3, 4].

Внутрішні напруження можуть виникнути і без чужорідних елементів у зв'язку з тим, що в процесі переходу компаунда з високоеластичного в склоподібний стан різко збільшується в'язкість і зменшується швидкість високоеластичної деформації. В результаті в компаунді виникають так звані "гартівні" напруження. Ці напруження можуть бути причиною жолоблення литих і пресованих полімерних деталей, появи тріщин і вторинних небажаних змін стану. Ці напруження можуть бути зняті шляхом відпалу і надалі розглядатися не будуть.

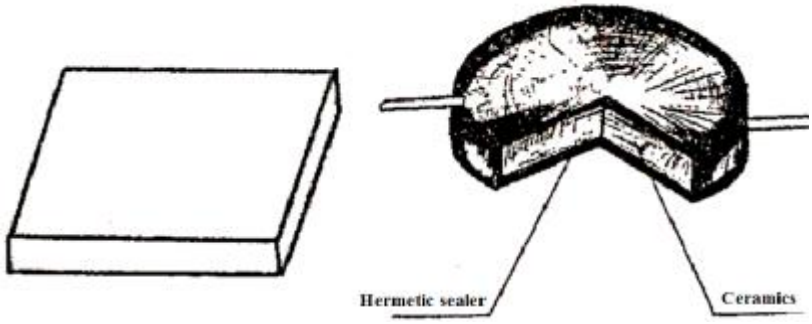

Рис. 4. Конденсатор виду: а) КМ-5в; б) К15-5

Термічні напруження обумовлені різними температурними коефіцієнтами лінійного розширення (ТКЛР) компаунда і герметизованих деталей. Згідно теорії пружності, будь-який обсяг однорідної термічно ізотропної речовини з ТКЛР більше нуля при охолодженні зменшується в розмірах без появи напружень за умови, що його температура змінюється рівномірно, і немає сил (зовнішніх чи внутрішніх), які заважають вільній зміні розмірів. А в з'єднаній системі "компаунд-електрорадіоелемент" ці умови, як правило, створити неможливо. Фактично деформація компаунда не проходить вільно через різні ТКЛР елементів, які складають з'єднану систему. Таким чином, при охолодженні компаунда, що затвердіває, в ньому виникають термічні внутрішні напруження, які збільшуються у міру охолодження.

Очевидно, що внутрішні напруження не є фізичною константою, як, наприклад, питома вага, ТКЛР та інші властивості компаунда. Говорячи про внутрішні напруження в компаундах, мають на увазі явище, обумовлене фізико-механічними взаємодіями компаунда і герметизованої деталі. Хімічна (набухання деяких електроізоляційних матеріалів, пошкодження лакофарбового покриття елементів РЕА та інше) взаємодія в цих роботах не розглядається.

Більшість неметалічних матеріалів, які застосовуються в конструкціях радіоелектронних систем (РЕС), є полімерами. Це пластмаси і гума, компаунди і клеї, скло і ситали, азбест і кераміка, слюда, кварц та інші.

Номенклатура полімерних матеріалів дуже велика, а інформації про їх властивості мало, тому правильно обрати матеріал для конкретної РЕС дуже складно. На практиці нерідко виникає необхідність комплексного використання полімерних матеріалів в конструкціях РЕС. Разом з функціями електричної ізоляції полімери виконують роль конструкційних матеріалів.

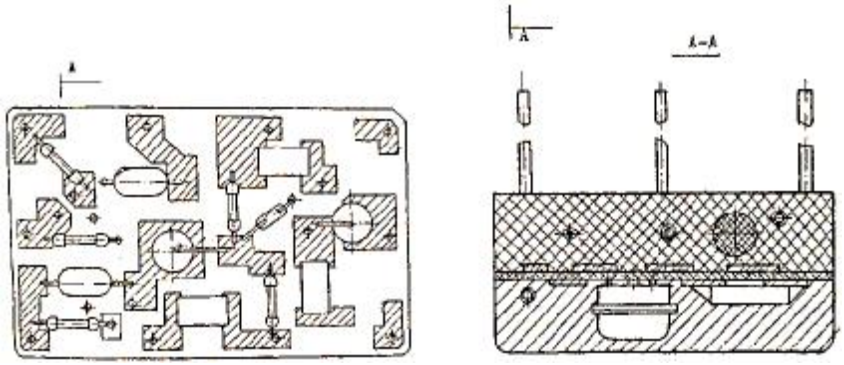

Рис. 5. Резистори, конденсатори та інші ЕРЕ в мікрозбірці

Історично склалося так, що широке застосування полімерних матеріалів в електроніці відбулося на початку періоду мініатюризації, коли вироби, які герметизувалися, ще мали значні розміри і великі коефіцієнти запасу міцності. І на додачу рівень механічних впливів був нижче тих навантажень, які діють на сучасні РЕС. В той період характеристики полімерних матеріалів були мало вивчені і основні роботи були присвячені удосконаленню технології виробництва полімерів і технології герметизації РЕС.

Це і визначило те, що наукові роботи в основному присвячувалися міцності герметиків. В міру мініатюризації РЕС з'явилася проблема міцності елементів, які герметизуються, і в літературі стали з'являтися рекомендації з оцінки взаємодії елементів і конструкцій з герметизуючими матеріалами.

Розвиток техніки ставив перед інженерами все нові завдання, пов'язані з ускладненням умов роботи РЕС, і це викликало появу проблем, в яких потрібно було проводити розрахунки і розробляти методики випробувань апаратури при механічних і кліматичних впливах.

Слід зауважити, що якщо в початковий період мікромініатюризації в радіоелектроніці застосування методів і засобів, які використовувались у загальному машинобудуванні для вимірювання деформацій і напружень, було просто неможливим, то в даний час прогрес техніки вимірювання неелектричних величин електричними методами відкриває можливість для застосування деяких методів в електроніці.

Як показано в роботі [5], велике значення для працездатності РЕС, що герметизуються, має застосування полімерних герметизуючих матеріалів із заданими фізико-механічними властивостями. Тому певну кількість робіт присвячено вивченню фізико-механічних характеристик існуючих герметизуючих матеріалів [6–8], а також нових марок, які розроблюються, характеристики яких цілком би задовольнили вимоги працездатності конструкцій РЕС [9–11]. Визначення цих характеристик здійснюється експериментально (шляхом випробувань дослідних зразків матеріалу), або теоретично (шляхом розрахунків із залученням тих чи інших спрощених моделей, які описують процеси в полімерних матеріалах) [12–14].

Відомо, що фізико-механічні властивості герметиків, зокрема, внутрішні напруження в них, багато в чому залежать від режимів полімеризації. Конкретні рекомендації щодо вибору режимів полімеризації для різних рецептур герметизуючих матеріалів наводяться в літературі [13–15], але в цих роботах не враховується вплив заповнення обсягу елементами схеми.

Існують формули для розрахунку коефіцієнта лінійного теплового розширення (КЛТР) герметиків, виходячи з об'ємного вмісту компонентів [14, 15]. Проте ці формули не враховують механічної взаємодії наповнювача і ряду інших чинників. Відома також формула для розрахунку модуля пружності композицій, скріплених частинками [16], але вона враховує лише об'ємний вміст компонентів.

В роботах [3, 17] вказується, що фізико-механічні характеристики багато в чому залежать від складу полімерного матеріалу. Зокрема, введення пластифікаторів викликає зниження температури склоутворення і модуля пружності, що обумовлює необхідність більш поглибленого вивчення міцності конструкцій РЕС, герметизованих такими матеріалами, наприклад, вивчення виникнення і розподілу залишкових напружень у з'єднаннях на основі епоксидних смол [18, 19–24].

В роботах [2, 25] та інших вказується на випадковий характер механічних характеристик матеріалів. Проте, як правило, тут для обробки експериментальних даних застосовується нормальний закон розподілу ймовірності, який найчастіше не описує реальний стан речей [17]. Тому є сенс продовжити дослідження статистичного характеру властивостей матеріалів і виробів з урахуванням того факту, що ці випадкові величини можуть мати не лише ненормальні, але і у ряді випадків, не одномодальні закони розподілу.

Аналізуючи дослідження, описані в розглянутих вище роботах, варто відмітити, що, будучи проведеними на лабораторних зразках або спрощених теоретичних моделях, вони носять більше якісний, аніж кількісний характер, що істотним чином обмежує сферу їх застосовності для реальних конструкцій. Між тим, практичні умови роботи герметизуючих матеріалів у всьому робочому діапазоні температур настільки складні, що їх повний облік поки неможливий і необхідні випробування в реальних умовах експлуатації [24].

Як стверджується в тій самій роботі [24], необхідно визначати ті фізико-механічні показники герметиків, які служать для характеристики та порівняння матеріалів, забезпечення даними для розрахунку та визначення експлуатаційних характеристик, контролю якості продукції власне в процесі виробництва. Об'єктивна наукова оцінка методів випробувань приводить до висновку про неправильність довільного

застосування методів випробувань. Тут же вказується, що швидке зростання промисловості полімерів неминуче ставить практику перед теорією, а складність властивостей полімерів обумовлює недостатність наших знань про матеріали. В роботі робиться спроба вирішення зазначеної проблеми шляхом переоцінки явищ і перегляду підходу до випробувань. Проте вона в основному присвячена розвитку динамічних впливів і методів випробувань, які не враховують вплив статичних навантажень на міцність полімерів.

В ряді випадків фізико-механічні характеристики, які наводяться в різних роботах навіть одного і того ж автора, мають велике розходження. Так, зазначені в роботі [11] значення КЛТР ряду компаундів майже в три рази відрізняються від коефіцієнтів, зазначених у роботі [25] для цих же компаундів. Незважаючи на це, особливо цінним тут є експериментально отримані залежності фізико-механічних характеристик деяких компаундів від температури, але, на жаль, відсутні дані по розкиду цих характеристик.

Надалі ми сконцентруємося на дослідженні міцності і герметичності циліндричних компаундованих гермоузлів з прохідними виводами на прикладі тонко-плівкових і електролітичних конденсаторів (рис. 3).

Література

1. Харпер Ч. Заливка электронного оборудования синтетическими смолами / Ч. Харпер ; пер. с англ. – М. : Энергия, 1964. – 408 с.

2. Трифонюк В. В. Надежность устройств промышленной электроники / В.В. Трифонюк. – К. : Лыбидь, 1993. – 62 с.

3. Каргин В. А. Влияние объемной концентрации пластификатора на температуру стеклования пластика / В. А. Каргин, Ю. И. Малинский // Докл. АН СССР. – 1950. – Т. 73, № 5.

4. Каргин В. А. Краткие очерки по физикохимии полимеров / В. А. Каргин, Г. Л. Слонимский. – М. : Химия, 1967. – 232 с.

5. Карина Т. Л. Эпоксидные – полиэфирные заливочные компаунды / Т. Л. Карина, М. А. Голубенко // Электронная техника. Материалы. – 1968. – Вып. 4. – С. 125–133.

6. Савинский П. А. Новые герметизирующие материалы, свойства и применение / П. А. Савинский. – Л. : ЛДНТП, 1971. – 18 с.

7. Черняк К. И. Эпоксидные компаунды и их применение / К. И. Черняк. – Л. : Судостроение, 1967. – 400 с.

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

9. Кан К. Н. Механическая прочность эпоксидной изоляции / К. Н. Кан, А. Ф. Николаевич, В. М. Шанников. – Л. : Энергия, 1973. – 148 с.

10. Герметизация полимерными материалами в радиоэлектронике / Б. М. Тареев, Л. В. Яманова, В. А. Волков, Н. Н. Ивлев. – М. : Энергия, 1974. – 302 с.

11. Гуль В. Э. Структура и механические свойства полимеров / В. Э. Гуль, В. Н. Кулезяев. – М. : Высшая школа, 1986. – 312 с.

12. Ковальская А. В. Эпоксидные заливочные компаунды / А. В. Ковальская // Вестник электромашинопромышленности. – 1960. – № 2. – С. 1–6.

13. Черняк К. И. Эпоксидные компаунды и их применение / К. И. Черняк. – Л. : Судостроение, 1967. – 400 с.

14. Котрубенко Б. П. В ТКР некоторых компаундов, используемых для герметизации / Б. П. Котрубенко // Микропривод и приборы сопротивления. – Кишинев, 1967. – С. 280–282.

15. Современные композиционные материалы / под ред. Л. Браутмана, Р. Крока ; пер. с англ. – М. : Мир, 1970. – 672 с.

16. Журков С. Н. Проблема прочности твердых тел / С. Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1957. – № 11. – С. 78–82.

17. Галушко А. И. Влияние свойств полимеров на надежность герметизированной аппаратуры / А. И. Галушко, Ю. Ф. Гедыч. – М. : Информстандартэлектро, 1969. – 52 с.

18. Абибов А. Л. Исследование остаточных (внутренних) напряжений в армированном эпоксидном полимере / А. Л. Абибов, Г. А. Молодцов // Механика полимеров. – 1965. – № 4. – С. 70–80.

19. Hagedorn M. Die Clasharz-Crenzflache als zenrtelpreblem oler clasgasertarkten kunststoffe / M. Hagedorn. – Kunstoffe, 1962. Bd 52, H 10. S. 605–612.

20. Hasllett W. Shrinkage stresses in glass filament systems / W. Hasllett, Mc. Carry J. – Modern plasteecs, 1962. – Vol 40. – № 4. – P. 135–192.

21. Тернер С. Механические испытания пластмасс / С. Тернер ; пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1979. – 144 с.

22. Локтаев В. С. Технология производства микромодулей / В. С. Локтаев, В. Д. Гимпельсон. – М. : Энергия, 1973. – 144 с.

23. Кан К. Н. Оценка работоспособности полимерных компаундов / К. Н. Кан. – Л. : ДДНТП, 1974. – 18 с.

24. Гусев В. П. Технология радиоаппаратуростроения / В. П. Гусев. – Г. : Высшая школа, 1972. – 496 с.

25. Zee H. Epoxy resins / H. Zee, K. Neville. – New York, 1967. – 922 p.

Рецензія/Peer review : 28.1.2016 р. Надрукована/Printed : 11.2.2016 р.
Рецензент: д.т.н., доцент Любчик В.Р.