

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАТОРІВ ВНУТРІШНІХ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ НА АДГЕЗІЮ ТА КОГЕЗІЮ ПОВЕРХНЕВИХ ПОКРИТЬ

© Матвійків М.Д., Петрушка А.І., 2011

**Висвітлено основні джерела виникнення концентраторів внутрішніх механічних напружень та їхній вплив на деформаційні зміни когезії та адгезії поверхневих покриттів деталей.**

**Ключові слова:** концентратор, деформаційні зміни.

**This paper describes the main sources of internal mechanical tensions concentrators and their influence on deformation changes of cohesion and adhesion of details surface coatings.**

**Key words:** concentrator, deformation changes.

### I. Вступ

Однією з найважливіших конструкційних особливостей більшості деталей є наявність у них поверхневих покриттів (захисних, ґрунтувальних, декоративних тощо). Досліди показують, що не зважаючи на старанний підбір матеріалів, способів та режимів нанесення поверхневих покриттів, вони здебільшого не повною мірою задовольняють висунуті до них вимоги. Однією з причин цього є те, що вони перебувають у напруженому стані, який зумовлюється наявністю в них внутрішніх механічних напружень (ВМН) величиною  $\approx (10^8 \dots 10^9)$  Па [1]. Наші дослідження, дослідження інших авторів показують, що ВМН впливають на механічні, електричні, магнітні, оптичні тощо. властивості покриттів. Під час оцінювання такого впливу здебільшого користають інтегральним значенням ВМН, усередненим по поперечному перерізу покриття. Це, звичайно, знижує точність такого оцінювання, оскільки ВМН нерівномірно розподілені по перерізу. Причиною цього є неоднорідності складу, структури, різноманітні зміни товщини та конфігурації тощо. У зв'язку з цим актуальним є кількісне оцінювання значення концентраторів у збільшенні ВМН, оскільки саме в місцях найбільшої концентрації напружень відбуваються зародження мікротріщин, відшарування та інші небажані ефекти та явища.

### II. Основна частина

Як відомо [2], ВМН складаються з двох складових: власної  $\sigma_{вл}$  і термічної  $\sigma_T$ , тобто

$$\sigma = \sigma_{вл} + \sigma_T. \quad (1)$$

Розмір  $\sigma_{вл}$  визначається неповним структурним впорядкуванням покриття, різноманітними включеннями і відмінністю кристалічної ґратки покриття і основи, а  $\sigma_T$  – відмінностями ТКР покриття і основи та різницею температур виготовлення та експлуатації покриття. Досліди показують, що кожна із складових має свої концентратори напружень. Для власної складової концентратором ВМН являється сама поверхня основи деталі виробу, на яку наноситься покриття, адже параметр кристалічної ґратки останнього, як правило, не збігається з параметром кристалічної ґратки основи. Внаслідок розбіжності параметрів кристалічних ґраток матеріалів покриття та основи на межі розподілу відбувається стрибкоподібна зміна властивостей матеріалу, що призводить до деформування нижніх шарів покриття та скупчення в них різноманітних дефектів. Тобто границя розподілу між покриттям та основою являє собою дефектний шар, де зосереджуються концентратори напружень.

Так, наприклад, під час конденсації алюмінію (параметр кристалічної ґратки  $a_{Al} = 0,404$  нм) на поверхню платинові деталі ( $a_{Pt} = 0,392$  нм) виникає деформація стиску

$$\varepsilon_{Al} = \frac{a_{Al} - a_{Pt}}{a_{Al}} = \frac{0,404 - 0,392}{0,404} = 0,03, \quad \text{якій} \quad \text{відповідають} \quad \text{стискувальні} \quad \text{ВМН}$$

$$\sigma_n = \frac{E_{Al} \cdot \varepsilon_{Al}}{1 - \mu_{Al}} = 3 \cdot 10^9 \text{ Па [1].}$$

Верхні шари алюмінію формуються не на платиновій основі, а на нижніх шарах алюмінію, які хоч і деформовані, але не мають такої великої невідповідності постійної кристалічної ґратки, як платина. Тому в них виникають ВМН на порядок менші ( $\sigma_B \approx 3 \cdot 10^8$  Па). Коефіцієнт концентрації напруження біля поверхні основи К в цьому випадку в лінійному наближенні становитиме

$$K \approx \frac{\sigma_n}{(\sigma_n + \sigma_B)/2} \approx \frac{2\sigma_n}{(\sigma_n + \sigma_B)} \approx \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^9}{(3 + 0,3)10^9} \approx 2$$

Аналогічний вплив поверхні основи “відчувають” плівки інших матеріалів, зокрема міді і срібла, сформовані на поверхні діелектричних, наприклад, сітлових підкладок.

Якщо при цьому не брати до уваги початковий стан, пов’язаний з формуванням суцільних покриттів, якому відповідає товщина в декілька сотень нанстрем, то залежність ВМН  $\sigma$  від товщини  $d$  має вигляд, зображений на рис. 1.

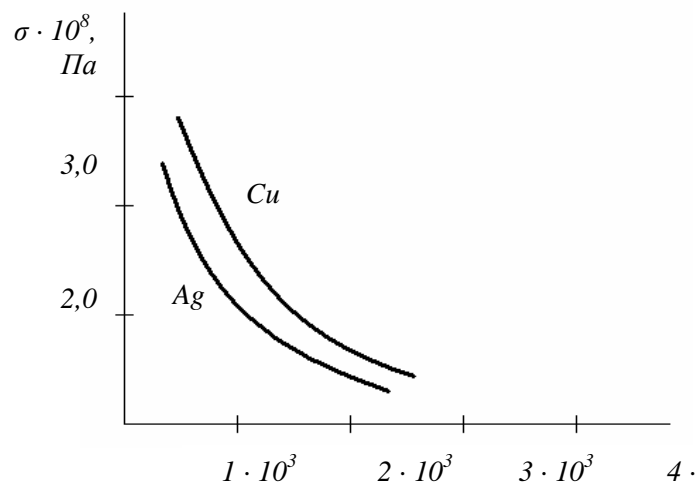


Рис. 1. Типова залежність ВМН від товщини покриття

Коефіцієнт концентрації напружень К, визначений за даними рис. 1, теж приблизно дорівнює 2.

Концентраторами ВМН також є краї пліткових елементів, подряпини, вікна, що, очевидно, пояснюється їх високою дефектністю. Найбільші ВМН спостерігаються на відстані від краю  $l$ , що дорівнює товщині плівки  $d$ , тобто

$$l \approx d. \quad (2)$$

Їхня максимальна величина в цьому місці  $\sigma_{K \max}$  приблизно в два рази перевищує середні напруження в плівці, тобто

$$\sigma_{K \max} \approx 2\sigma, \quad (3)$$

що відповідає коефіцієнту концентрації  $K \approx 2$ .

В області  $l = 0 \dots d$  нормальні до перерізу поверхневого покриття напруження  $\sigma$  трансформуються в дотичні до перерізу покриття напруження  $\tau$  [3], які намагаються відірвати покриття від основи. Величина цих дотичних напружень  $\tau$  визначається відношенням пружної сили

$$F = \sigma \cdot b \cdot d \quad (4)$$

до площини поперечного перерізу

$$S = b \cdot d. \quad (5)$$

Тобто

$$\tau \approx \frac{F}{S} \approx \frac{\sigma \cdot b \cdot d}{b \cdot d} \approx \sigma. \quad (6)$$

У формулах (4)–(6)  $b$  – ширина пліткового елемента, а  $d$  – його товщина.

Отже, дотичні до поперечного перерізу покриття напруження  $\tau$  за величиною дорівнюють нормальним до поперечного перерізу напруженням  $\sigma$ . Вони простягаються вглибину приблизно на товщину покриття, а їхній розподіл істотно залежить від форми краю (рис. 2).

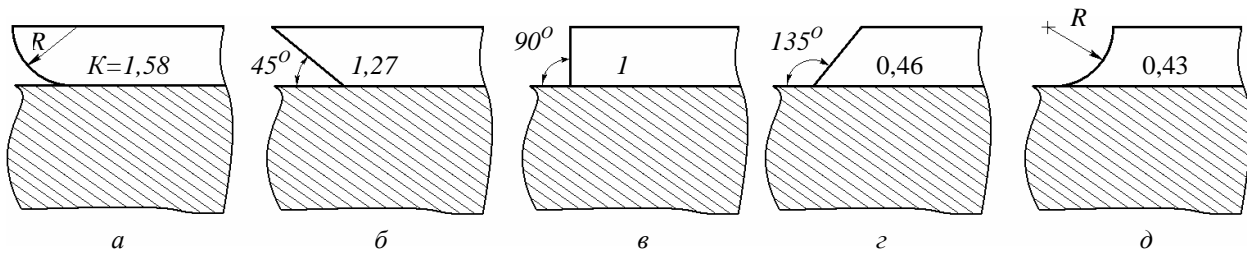


Рис. 2. Розподіл дотичних до поперечного перерізу покриття напружень у краях різної форми [4]

Видно, що коефіцієнт концентрації тангенціальних напружень залежно від форми краю змінюється в межах від 0,43 до 1,58, тобто

$$0,43 < K < 1,58 \quad (7)$$

Тут  $K$  визначається як відношення максимальних тангенціальних напружень  $\tau_m$  до тих тангенціальних напружень  $\tau_n$ , які відповідають перпендикулярному до поверхні основи перерізу.

Якщо припустити, що кожен вид дефекту поверхні покриття характеризується певною формою краю, то відповідно до рис. 2 їм відповідатиме конкретний коефіцієнт концентрації напружень.

Так, в результаті нанесення подряпини на поверхні покриття утвориться рівчак, краї якого можуть набувати певного радіуса скруглення (рис. 2, д) або утворювати з поверхнею основи тупі кути (рис. 2, г). Тобто коефіцієнт концентрації напружень біля країв подряпини приблизно становить 0,43–46.

У разі повітряної порожнини біля її країв покриття з основою імовірно можуть утворювати гострі кути (рис. 2, а – в). Якщо прийняти, що кут між покриттям та основою біля краю повітряної порожнини може бути максимально наближеним до  $0^\circ$  і не може перевищити  $90^\circ$ , то коефіцієнт концентрації напружень приблизно перебуває в межах

$$1 < K < 1,58. \quad (8)$$

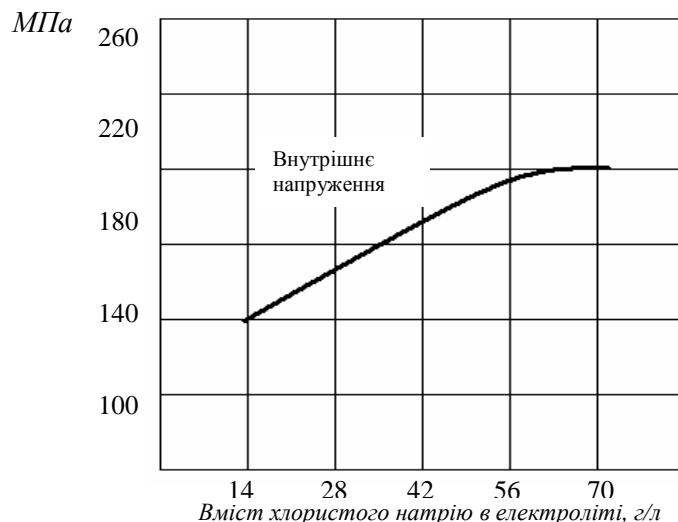


Рис. 3. Вплив складу електроліту та рівень ВМН у покриттях нікелем [5]

Вагомий внесок у розподіл ВМН також робить неоднорідність структури покриття, зумовлена присутністю різноманітних сторонніх елементів, металів і неметалів, оксидів, гідридів, колоїдних сполук, води і поверхнево-активних речовин. Поява таких небажаних включень під час формування поверхневих покриттів різними методами спричинена наявністю домішок в електролітах, розплавах, порошках тощо. Так, наприклад, присутність хлористого натрію в електроліті призводить до підвищення ВМН в електроосаженному покритті нікелем, оскільки сильно гідратовані іони хлору і

натрію приносять в прикатодну плівку гідратну воду, яка, взаємодіючи з нікелем, утворює металопоподібні гідриди. У результаті включення в структуру покриття гідриди можуть підвищити ВМН до критичного значення 300 МПа, за якого відбувається його розтріскування. Якщо врахувати, що середнє значення ВМН у нікелевому покритті, визначене з рис. 3, становить  $\approx 180$  МПа, то коефіцієнт концентрації напруження біля домішки становитиме  $K \approx 1,67$ .

Концентратором напружень є також прямокутний згин плівкових елементів (рис. 4).

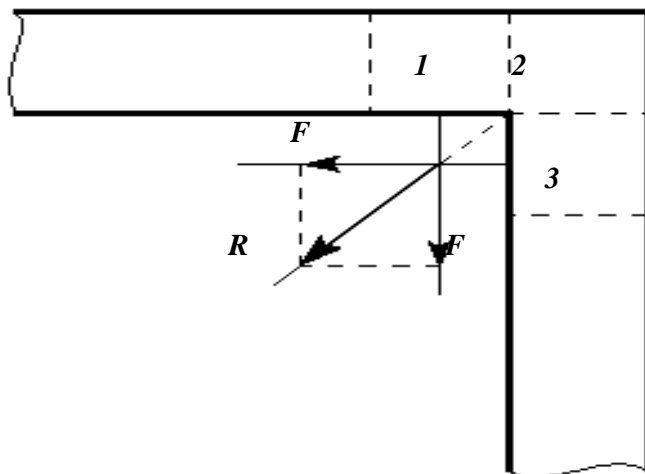


Рис. 4. Прямокутний згин плівкових елементів: 1, 2, 3 – квадрати;  
 $F$  – пружні сили 1 і 3 квадратів;  $R$  – рівнодійна пружних сил  $F$

Видно, що рівнодійна  $R$  пружних сил  $F$  першого і третього квадратів дорівнює їх геометричній сумі, тобто

$$R = (F^2 + F^2)^{1/2} = \sqrt{2}F = \sqrt{2}\sigma \cdot b \cdot d \quad (8)$$

На підставі цього можна зробити висновок, що ВМН в ділянці внутрішнього згину в  $\sqrt{2}$  разів більші, ніж ВМН за межею внутрішнього згину.

Кожен вид концентратора чинить специфічний, властивий йому вплив на механічні властивості поверхневих покриттів. На рис. 5 наведено внески вищенаведених концентраторів у загальну дію на адгезію та когезію поверхневого покриття.

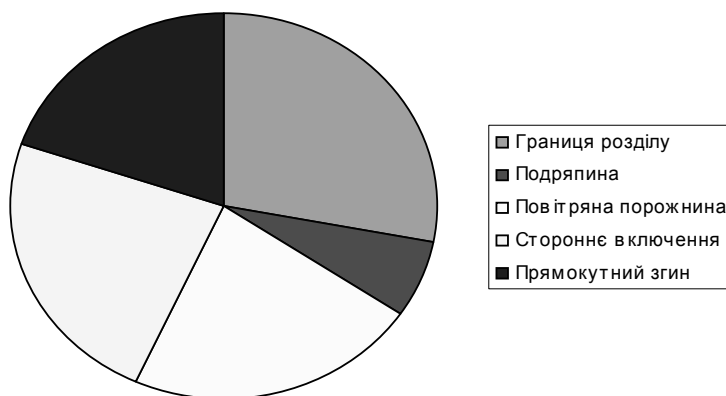


Рис. 5. Співвідношення внеску різноманітних концентраторів механічних напружень у загальну дію на механічні властивості поверхневих покриттів

З рис. 5 видно, що найбільшу небезпеку для цілісності системи “покриття-основа” становить вплив границі розділу та сторонніх включень. Результати досліджень впливу найпоширеніших концентраторів ВМН на адгезію мідного покриття різної товщини, отримані на основі моделі [6], наведено в таблиці.

**Адгезійна міцність на зсув та на відрив мідного покриття  
з врахуванням впливу концентраторів механічних напружень**

Товщина покриття, мкм	Адгезійна міцність на зсув, МПа	Адгезійна міцність на відрив, МПа	Адгезійна міцність на зсув із врахуванням К, МПа	Адгезійна міцність на відрив з врахуванням К, МПа	Вид концентратора ВМН
0,04	34,96	118,864	32,92	111,928	Границя розділу
0,09	25,4	86,36	12,8	43,52	
0,04	34,96	118,864	33,7768	114,8411	Повітряна порожнина
0,09	25,4	86,36	18,092	61,5128	
0,16	18,96	64,464	5,5968	19,02912	
0,04	34,96	118,864	33,5932	114,2169	Стороннє включення
0,09	25,4	86,36	16,958	57,6572	
0,16	18,96	64,464	3,5232	11,97888	
0,04	34,96	118,864	34,1236	116,0202	Прямокутний згин
0,09	25,4	86,36	20,234	68,7956	
0,16	18,96	64,464	9,5136	32,34624	

За даними таблиці отримано діаграми, які наочно демонструють залежність адгезії мідного покриття від впливу різноманітних концентраторів ВМН: величина адгезійної міцності мідного покриття, розрахована з врахуванням коефіцієнтів концентрації ВМН К є нижчою від величини адгезійної міцності, розрахованої без врахування К, приблизно на 5–10 %.

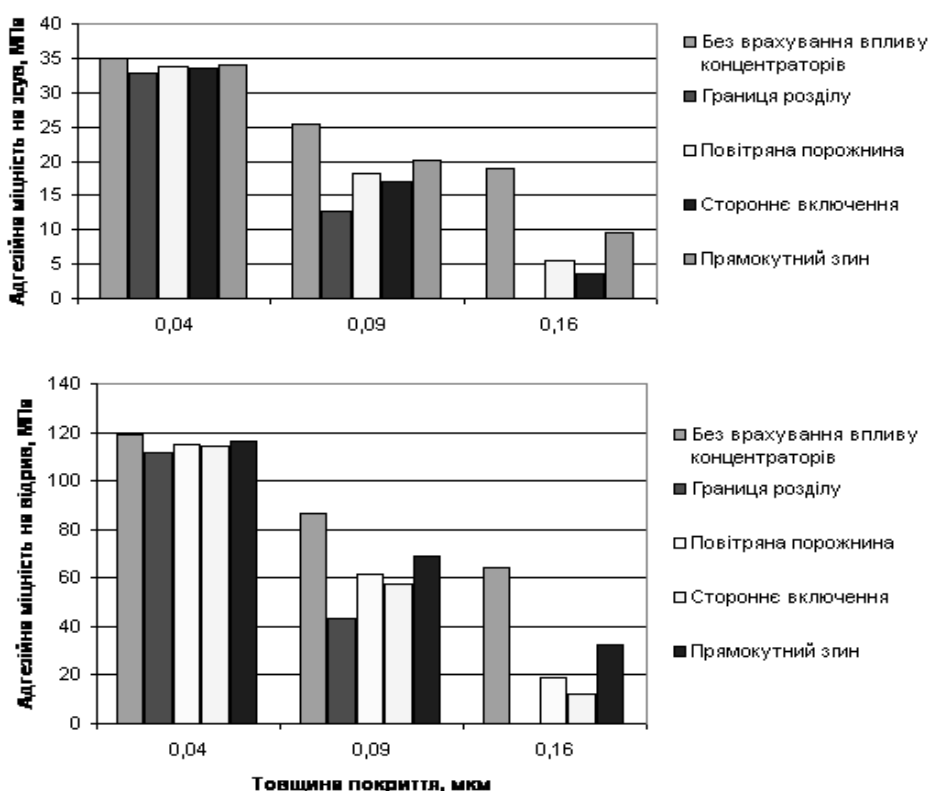


Рис. 6. Співвідношення адгезійних міцностей на зсув та відрив мідного покриття з врахуванням та без врахування концентраторів ВМН

### III. Висновки

1. Досліджуючи вплив пружних деформацій на властивості поверхневих покриттів необхідно враховувати дію концентраторів ВМН.

2. Концентратори в декілька разів ( $\approx 1,1-2$  рази) збільшують величину нормальних до поперечного перерізу механічних напружень і в  $0,43-1,58$  разів змінюють величину тангенціальних механічних напружень.

1. Палатник А.С., Фукс М.Я. Косевич В.М. Механизм образования и субструктура конденсированных пленок. – М.: Наука, 1972. – 318 с. 2. Р.У. Гофман. Механические свойства тонких конденсированных пленок. – ФТП, Т.3. – М.: Мир, 1978. – 358 с. 3. Г.И. Елифанов, Ю.А. Мома. Физические основы конструирования и технологии РЭА и ЭВА. – М.: Советское радио, 1979. – 350 с. 4. Н.П. Захаров, А.В. Багдасарян. Механические явления в интегральных структурах. – М.: Радио и связь, 1992. – 146 с. 5. Электрохимические покрытия изделий радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / И.Д. Груев, Н.И. Матвеев, Н.Г. Сергеева. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с. 6. Матвійків М.Д., Петрушка А.І. Вплив пружних деформацій на властивості пліткових систем / Збірник наукових праць 1-ї міжнар. конф.і “Електронна база: стан та перспективи розвитку”. – Т.3. – МРСП Харків–Судак, 2008. – С. 91–94.

УДК 621.396.

Л.А. Недоступ, М.Д. Кіселичник, П.М. Заярнюк  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань

## ОЦІНЮВАННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ РЕА ЗА РІВНЕМ ПАРЦІАЛЬНОЇ ВИРОБНИЧОЇ ДЕФЕКТНОСТІ

© Недоступ Л.А., Кіселичник М.Д., Заярнюк П.М., 2011

Розглянуто процес формування парціальної виробничої дефектності. Наведені результати експериментально-статистичних досліджень відмов радіоелектронної апаратури з причин виробничої дефектності і отримані аналітичні залежності показників надійності виробів від допущеної дефектності. Результати можуть бути використані для розроблення математичних моделей процесів формування надійності.

**Ключові слова:** надійність, безвідмовність, дефектність, інтенсивність відмов, імовірність безвідмовної роботи, імовірність пропуску дефектів.

**In this paper the process of partial manufacturing defect are given. Results of experimental and statistical studies of failures of electronic equipment production by these defections. Analytical products depending on the reliability of assumed defect received. Results can be used to develop a mathematical models of processes forming of reliability.**

**Key words:** defect, forming of reliability, process, failures.

### Вступ

Визначення і забезпечення надійності радіоелектронної апаратури (РЕА) набуває конкретного змісту з розкриттям поняття працездатності як здатності виконувати нею задані функції згідно з призначенням.

Втрата працездатності або відмова апаратури є подією випадковою в часі, але не випадковою за своєю причинно-наслідковою фізичною сутністю. Вона зумовлена одним або деякою множиною дефектів, які з певною імовірністю супроводжують усі стадії її життєвого циклу. Не зменшуючи значущості дефектності, що виникає під час проектування і експлуатації РЕА, статистика засвідчує, що переважаючою для більшості її видів залишається виробнича дефектність, яка і спричиняє основну кількість відмов. Однією з причин такого стану є недостатнє вивчення процесів утворення парціальної виробничої дефектності, її природи, структури і впливовості на формування надійності виробів на всіх стадіях технологічного процесу. Таким напрямком дослідження присвячена ця стаття.