

УДК 621.791.763.2

В.І. БілобородченкоНаціональний університет “Львівська політехніка”,
кафедра зварювального виробництва, діагностики
і відновлення металоконструкцій**КРИТЕРІЇ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ
ПОЧАТКОВОГО КОНТАКТНОГО ОПОРУ ПРИ ТОЧКОВОМУ
КОНДЕНСАТОРНОМУ МІКРОЗВАРЮВАННІ**

© Білобородченко В.І., 2003

**Запропоновані критерії подібності для оцінювання початкового контакт-
ного опору, створені на основі принципів Фур'є та π -теореми.****Similarity criteria for the evaluation of size of initial contact resistance, created
on the basis of Fourier- principles and are offered π - theorems**

Аналіз причин виникнення найбільш типових масових дефектів, які виникають при точковому конденсаторному мікрозварюванні виробів прецизійного приладобудування та радіоелектроніки, вказує на порушення провідної умови стабільності й гарантованої якості мікроконтактного зварювання – дисбаланс енергетичної тотожності тепловиділення зони формування зварної точки $Q_{з.т}$ та зони зварювання $Q_{з.з}$ [1]. Це пов'язано з дестабілізуючим впливом теплових генераторів, що створюються на контактних переходах у зоні зварення. Інтенсивність впливу таких генераторів першочергово, з рештою рівних умов, залежить від стану контактної поверхні складених деталей, який оцінюється величиною початкового контактного гальванічного опору і є важливим технологічним параметром, що визначає якісні показники зварного виробу.

Контактні складові опору зони зварювання, з урахуванням розмірів виробів (товщини до 200...300 мкм), застосованих матеріалах, обмеженнях щодо вибору технологічно доцільного зусилля стискання контактних пар (1...10 ДаН), становлять не менше ніж 60% його загального початкового контактного опору R_0 . В таких умовах розкид початкового опору становить 500...2000%, а для певного, відповідного технологічному режиму зварювання, зусилля стискання величина R_0 знаходиться в межах 1,5...4 рази більше (менше) математичного очікування. Таким чином навіть підтримування незмінним значення $Q_{з.т}$ не дає змогу на сучасному обладнанні гарантувати бездефектність технологічного процесу контактного мікроточкового зварювання за рахунок варіації початкового контактного опору зони електрод – електрод.

Для оцінного розрахунку R_0 у діапазоні технологічно доцільних зусиль стискання використовуються різноманітні модельні аналоги від емпіричних, емпірично-статистичних до фізично імовірнісних, спеціалізованих як для певних матеріалів, геометрії контактної пари, так і універсальних [1–3].

Метою роботи є встановлення достатньо узагальнених критеріальних подібностей, достатніх і необхідних для надійного прогнозування величини початкового контактного гальванічного опору як запоруки забезпечення, з рештою рівних умов, якісних показників формування мікрозварних з'єднань.

Значна кількість модельних описів одного фізичного процесу формування початкового електричного контакту не тільки дає суперечливі результати, а й прямо вказує на неповне розуміння та урахування всіх ефектів, що супроводжують утворення гальванічного контакту під дією прикладеного зовнішнього зусилля.

Підтвердженням вищевикладеного є достатність перевірки істинності відомих моделей розрахунку (прогнозу) величини R_0 за теорією розмірності [4], а саме принципом Фур'є, за яким кожна складова строгого математичного модельного аналогу фізичного процесу повинна мати однакову розмірність.

З іншого боку, застосування до такого ансамблю модельних аналогів процедури розроблення універсальних критеріальних моделей на основі π -теорема [4], за якою для створення математичної моделі фізичного об'єкта достатнім є знання тільки його параметрів (факторів), є важливою науково-прикладною задачею, спрямованою як на забезпечення якості формування точкових мікрозварних з'єднань, так й знаходження коректних критеріїв подібності, що дають змогу з достатньою достовірністю прогнозувати та досліджувати стан контакту.

За Фур'є-принципом протестовані найбільш рекомендовані для інженерного оцінювання величини R_0 моделі формування гальванічного опору контакту

$$R_0 = \frac{\rho \sqrt{\pi \tau_{3H}}}{2Pe^b}, \quad (1) \quad R_0 = \frac{\rho \sqrt{\pi \eta HB}}{2\sqrt{Pe}^n}, \quad (5)$$

$$R_0 = \frac{\rho \sqrt{\pi HB}}{2\beta_{ef} Pe^k}, \quad (2) \quad R_0 = \frac{\rho_2 (2\lambda_2 + \lambda_1) + \rho_1 \lambda_1}{4 \sqrt{\frac{Pe}{\pi HB}} (\lambda_1 + \lambda_2)}, \quad (6)$$

$$R_0 = \frac{R_{01}}{Pe^\alpha}, \quad (3) \quad R_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n P_3 \sqrt{\alpha_i \beta_i}}, \quad (7)$$

$$R_0 = \frac{\varepsilon}{Pe^n}, \quad (4) \quad R_0 = \frac{K_{\Pi} \rho \sqrt{HB}}{\sqrt{Pe}}, \quad (8)$$

де ρ_i ; λ_i – питомий опір та теплопровідність матеріалів контактної пари; Pe – зусилля стискування контакту; $\sigma_{3M, HB}$ – напруження зм'яття та твердість контактного матеріалу; $a, b, k, \alpha, \varepsilon, \eta$ – коефіцієнти, що враховують показники топографії та стану поверхні; $K_{\Pi}, K(H)$ – коефіцієнти пропорційності та функціонального зв'язку з висотою мікрорельєфу поверхні; $f(\alpha_i/\beta_i)$ – функція зв'язку розмірів еліпса конічної моделі опису мікрорельєфу

поверхні; n – кількість плям провідності, $P_3 = \frac{4}{(\rho_1 + \rho_2) f(\frac{\alpha_i}{\beta_i}) K(H)}$

Наприклад, аналіз розмірностей для моделі (1) має вигляд

$$\begin{aligned} \{R\} [L^2 M T^3 I^2] &= L^3 M T^{-3} I^2 \{\rho\} \\ &L^{-1} M T^2 \{\sigma\} \\ &L M T^2 \{Pe\} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{або} \begin{cases} 2 = 3x_1 - x_2 - x_3 & [L] \\ 1 = x_1 - x_2 - x_3 & [M] \\ 3 = -3x_1 - 2x_2 - 2x_3 & [T] \\ -2 = -2x_1 & [J] \end{cases}$$

звідки $x_1 = 1; x_2 = 0,5; x_3 = -0,5$.

Тоді коректний дійсний вигляд модельного аналогу становить

$$R_0 = \frac{\rho \sqrt{\pi \sigma_{3,m}}}{2\sqrt{P_e}}. \quad (10)$$

Результати аналізу для решти наведених вище модельних аналогів оцінювання величини початкового контактного опору на базі використання принципу Фур'є подані в таблиці.

Показники Фур'є-аналізу моделей визначення початкового контактного опору R_0

Модель	x_1	x_2	x_3	x_4	Розмірність складових моделі	Примітки
(1)	1	0,5	-0,5	-	$[OM] = [OM]$	$b = 1/2$
(2)	1	0,5	-0,5	-	$[OM] = [OM][M]^{1/2-k}$	$k = 1/2$
(3)	1	$x_2 = x_3$	$-\infty$ $+\infty$	-	$[OM] = \frac{[OM][M]^\alpha}{[M]^\alpha}$	$\alpha - const$, що не відповідає фізиці процесу формування контакту при різних зусиллях стискування
(4)	-1; 1 -2; 2	0	0	-	$[OM] = \frac{[?]}{[M]^n}$	$[?] \equiv K_n^* = 1? = [OM][M]^n$
(5)	1	0,5	-0,5	-	$[OM] = [OM]$	
(6)	1	0	-	1	$[OM] = [OM] \cdot K_n^*$	$K_n^* = 1/4$
(7)	1	$-(x_3+2)$	$-(2+x_3)$	1	$[OM] = \frac{[OM]}{[M]} \cdot K_n^*$	$K_n^* = [M]$
(8)	1	0,5	-0,5	-	$[OM] = [OM]$	$K_{II} \longrightarrow 1$

K_n^* – штучні коефіцієнти пропорційності для задоволення умови розмірності

З даних таблиці випливає, що лише 25% моделей задовольняють Фур'є-принцип, а з урахуванням уточнюючих K_n^* – коефіцієнтів не більше 75%.

Складові таких моделей використано у створенні критеріальної подібності для визначення початкового контактного опору R_0 . У рівняння зв'язку між параметрами, що визначають процес формування початкового гальванічного контакту, входять фактори: зусилля стискування елементів контактної пари P_e , фізико-механічні та тепло-електрофізичні показники матеріалу – $\rho, \lambda, HB, \sigma_{3,m}$, а також показники топографії контактної поверхні – ефективна площа гальванічної провідності S_e , шаруватість поверхні R_a (ГОСТ 2789–73), що є показовим для поверхонь деталей, використовуваних у прецизійному приладобудуванні та радіоелектроніці.

Тоді повне рівняння зв'язку становить

$$R_0 = f \left(KP_l^{x_1} \rho^{x_2} \lambda^{x_3} HB^{x_4} \sigma_{3M}^{x_5} S_l^{x_6} R_a^{x_7} \right), \quad (11)$$

де x_i – показники ступеня за умовою безрозмірності; K – безрозмірна постійна.

Відповідно π -теореми матрична форма (11) становить

$$R_0 = \begin{matrix} \begin{matrix} L \\ M \\ T \\ I \\ \theta \end{matrix} \end{matrix} \begin{bmatrix} P_l & \rho & \lambda & HB & \sigma_{3M} & S_l & R_a \\ 1 & 3 & 1 & -1 & -1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ -2 & -3 & -3 & -2 & -2 & 0 & 1 \\ 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ -3 \\ -2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

або в загальному вигляді для лінійних матричних рівнянь

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_m \end{vmatrix}; \quad (13)$$

для цього випадку

$$\begin{cases} x_1 + 3x_2 + x_3 - x_4 - x_5 + 2x_6 + x_7 = 2 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 1 \\ -2x_1 - 3x_2 - 3x_3 - 2x_4 - 2x_5 = -3 \\ -2x_2 = -2 \\ -x_2 = 0 \end{cases}. \quad (14)$$

Оскільки $m < n$ ($m=5; n=7$) система (13) не визначена, що вимагає встановлення її рангу- r для розширеної матриці (12); при їх тотожності система лінійних рівнянь (14) за Кронекером–Копеллі є сумісною. Ранг- τ визначався приведенням до трапецієподібної діагональної матриці

$$\begin{vmatrix} 1 & 3 & 1 & -1 & -1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0,5 \\ 0 & 0 & 1 & 1,8 & 1,8 & -1 & -0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8 & 0,4 \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Звідки $r=4$. Кількість критеріїв подібності за π -теоремою: $K_\pi = n - 2 + 1 = 4$. Оскільки $r = n$, то система (15) є сумісною, проте невизначеною, і має $f_b = n - r = 3$ - вільні невідомі, що можуть набувати довільні значення, а також $f_0 = r = 4$ - основні невідомі, що однозначно встановлюються вільними невідомими. Розв'язком (14) є такі значення показників ступеня при параметрах

$$x_1 = -(x_4 + x_5); \quad x_2 = 1; \quad x_3 = 0; \quad x_7 = 2(x_4 + x_5 - x_6) - 1.$$

Звідки основними показниками процесу формування гальванічного контакту є такі

$$P_e [x_1=(x_4+x_5)]; \rho^{(x_2=1)}; \lambda^{(x_3=0)}; R_a [x_7=2(x_4+x_5-x_6)^{-1}].$$

Отже, критеріальний запис процесу формування контактної провідності становить

$$R_0' = \left[\frac{\rho}{R_a} \left(\frac{HB}{P_e} R_a^2 \right)^{x_4} \cdot \left(\frac{\sigma_{зМ}}{P_e} R_a^2 \right)^{x_5} \cdot \left(\frac{S_e}{R_a} \right)^{x_6} \right]. \quad (16)$$

Рівняння (16) задає повну систему критеріїв подібності, які характеризують встановлення початкового контактного опору.

Оскільки x_4, \dots, x_6 можуть набувати, за визначенням, довільні значення, то при їх тривіальному значенні $x_4, \dots, x_6 = 0$ критерій подібності (16) становить

$$R_0' = \frac{\rho}{R_a}, \quad (17)$$

а при $x_4, \dots, x_6 = 1$

$$R_0' = \left[\frac{\rho}{R_a} \left(\frac{HB}{P_l} R_a^2 \right), \left(\frac{\sigma_{зМ}}{P_d} R_a^2 \right), \left(\frac{S_e}{R_a} \right) \right]. \quad (18)$$

Якщо врахувати відоме співвідношення $HB \approx (1,5 \dots 2,8) \sigma_{зМ}$, а також те, що форма (18) критеріального рівняння у вигляді добутку критеріїв подібності у різних ступенях може бути еквівалентною до форми запису критеріального рівняння у випадку наявності будь-яких функціональних зв'язків, то кінцева критеріальна форма визначення початкового контактного опору становить

$$R' = \frac{\rho}{R_a} F \left(\frac{HB}{P_e} R_a^2 \equiv C' \frac{\sigma_{зМ}}{P_e} R_a^2; \frac{S_e}{R_a^2} \right), C = 1,5 \dots 2,8. \quad (19)$$

Оскільки аналітичний вигляд F -функції невідомий, то рівняння (19) дає змогу дослідним шляхом фіксації одного з критеріїв та зміни інших отримати графічно інтерпретацію процесу (рис.1,2).

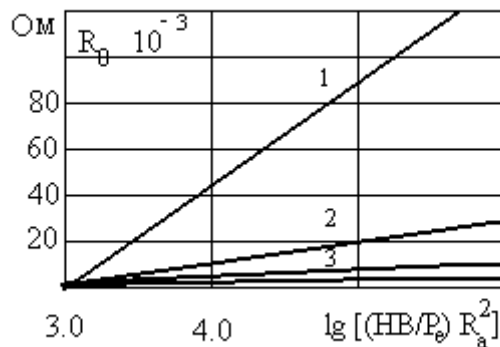


Рис. 1. Залежність зміни початкового опору від варіації критерію подібності $\frac{HB}{P_e} R_a^2$.

($R_a \equiv \Delta j$ – величина зняття мікрорельєфу при даному P_{ej}). Твердість матеріалу контактної пари: 1 – 3330HB (геометрія контакту – точка, матеріал вольфрамрениєвий сплав ВР10, діаметр дроту 100 мкм); 2 – 2700HB (геометрія контакту – точка, матеріал вольфрамрениєвий сплав ВР20, діаметр дроту 100 мкм); 3 – 1050HB (геометрія контакту – точка, матеріал мідь М1, діаметр дроту 100 мкм); 4 – 200HB (геометрія контакту – площина, матеріал бронза БрОФ-6,5-0,15, товщина листа 500 мкм)

Отже, безрозмірні критерії подібності (19) визначення початкового контактного опору за фізико-механічними показниками матеріалу, прикладеним зусиллям стискання Pe , з рештою рівних умов, демонструють, що осциляція величини R_0 при $Pe; HB; \sigma_{3M} = const$ визначається зміною мікрорельєфу R_a контактної поверхні, в той час як загальна площа провідності S_e зворотно пропорційна до R_a , проте є чутливою до геометрії площі контакту: точковий, лінійний, пластинковий [2]. Останнє підтверджується впливом шаруватості поверхні на співвідношення контактної та ефективної площин [1,2], критерієм (17) та даними [1] про позитивну дію підвищеної шаруватості та геометрії (точковий контакт) на зменшення початкового гальванічного контактного опору R_0 .

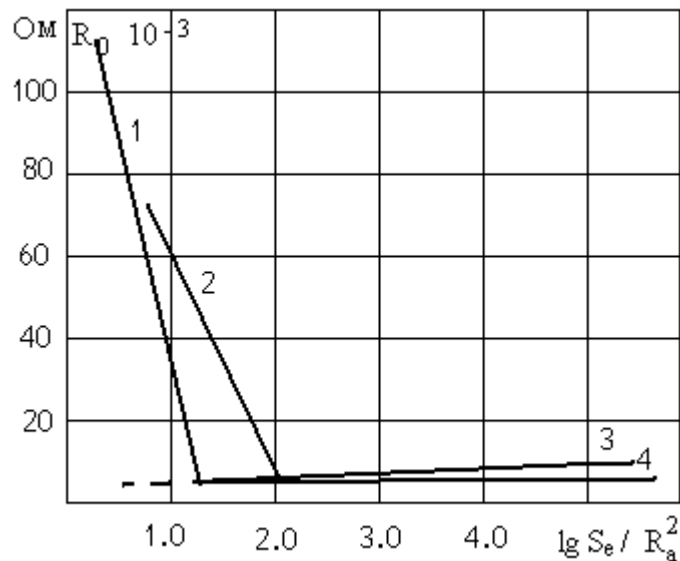


Рис.2. Залежність зміни початкового контактного опору від варіації критерію. Подібності $\frac{S_e}{R_a^2}$; ($R_a \equiv \Delta j$). Твердість матеріалу контактної пари: 1 – 3330НВ (геометрія контакту – точка, матеріал вольфрамрениєвий сплав ВР10, діаметр дроту 100 мкм); 2 – 1050НВ (геометрія контакту – точка, матеріал мідь М1, діаметр дроту 100 мкм); 3 – 900НВ (геометрія контакту – площина, матеріал мідь М1, товщина листа 500 мкм); 4 – 200НВ (геометрія контакту – площина, матеріал бронза БрОФ-6,5-0,15, товщина листа 500 мкм)

Висновки: 1. Відомі та рекомендовані для практичного використання модельні аналогії оцінювання величини початкового контактного опору лише на 25% (за ансамблем) задовольняють умову строгої розмірності.

2. Застосування принципів π -теорему до даного ансамблю модельних описів дозволило розробити універсальні критеріальні залежності процесу формування гальванічної провідності контакту за його оцінкою – величиною контактного опору.

3. Розроблені критерії подібності дозволяють розрахунок (прогнозування) величини початкового контактного опору залежно від технологічного параметра режиму зварювання (зусилля стискання), фізичних і електричних характеристик матеріалу контактної пари та топографії її поверхні.

4. Перспективним є застосування цих критеріїв для подальшого дослідження фізичним моделюванням процесів розвитку контакту за оцінним його параметром – зна-

ченням електричного опору, а також під час розроблення оптимальних технологічних режимів мікроконтактного точкового зварювання виробів прецизійного приладобудування та радіоелектроніки.

1. Моравский В.Э., Ворона Д.С. *Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки*. – К.: Наукова думка, 1985. – 272 с. 2. *Справочник по расчету и конструированию контактных частей сильноточных электрических аппаратов* / Н.М. Адоньев, В.В. Афанасьев, В.В. Борисов и др.; Под ред. В.В. Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 384 с. 3. Білобородченко В.І. Ймовірнісна модель зміни початкового контактної опору при точковому зварюванні деталей термоперетворювачів // Вісн. ДУ “Львівська політехніка”. – 1997. – № 323. – С. 3–8; 4. Алабужаев П.М., Геронимус В.Б., Минкевич Л.М. и др. *Теория подобия и размерностей*. – М.: Высшая школа, 1968. – 206 с.

УДК 621.791.763.2

В.І. Білобородченко

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра зварювального виробництва, діагностики
і відновлення металоконструкцій

КРИТЕРІЙ ОЦІНЮВАННЯ ДЕФЕКТНОСТІ ПРИ ТОЧКОВОМУ КОНДЕНСАТОРНОМУ МІКРОЗВАРЮВАННІ

© Білобородченко В.І., 2003

Запропонований критерій оцінювання відтворюваності показників якості технологічного процесу конденсаторного точкового мікрозварювання масових виробів радіоелектроніки та прецизійного приладобудування за встановленим законом статистичного розподілення дефектності зварювання.

An evaluation criterion is offered for providing indexes of quality of technological process condenser of point microwelding mass exact and radio electronic wares after the set law of the statistical distributing of imperfectness of welding.

Мікроконтактне точкове конденсаторне зварювання є статистично погано організованою системою, оскільки під дією параметрів (факторів) технологічного режиму в зоні формування зварного з'єднання виникають різноманітні електричні, теплові, механіко-деформаційні явища, різні за фізичною природою, проте одночасно плинні в часі циклу зварювання та об'єктивно нерозподільно впливові на характер і рівень формування дефектності продукції.

Оцінювання стабільності технологічного процесу конденсаторного точкового мікрозварювання в масовому виробництві вузлів радіоелектронних та виробів прецизійного приладобудування, а також дотримання відтворюваності їх якісних показників, ґрунтується на застосуванні стандартизованих контрольних карт якості продукції \bar{x}/S , \bar{x}/R , $\bar{\bar{x}}/R$ -типу, базованих на параметри нормального закону розподілення прояву зварювальних дефектів різного типу та виду [1].