

## КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ТОЧКОВОГО МІКРОЗВАРЮВАННЯ РОБОЧИХ КОНТАКТІВ ТЕРМОЗОНДІВ ЗА ПЛИННИМИ ПОКАЗНИКАМИ ФОРМУВАННЯ ЗВАРНОГО З’ЄДНАННЯ

© Білобородченко В.І., 2004

**Розглянуто результати досліджень з визначення показника якості формування зварного з’єднання, необхідного та достатнього для 100 % неруйнівного контролю виробів та регулювання технологічного процесу на базі плинних параметрів мікро-точкового конденсаторного зварювання робочих контактів термозондів.**

**The results of researches by definition of a parameter of quality of formation of welded connection necessary and sufficient for 100 % of the not destroying control of products and regulation of technological process on the basis of the current parameters of process of microdot condenser welding of working contacts of thermocouples are considered.**

Обсяги застосування монтажних-зварювальних операцій для виробів прецизійного приладобудування становлять у середньому 64 %, а для термозондів, з огляду на їх метрологічні та експлуатаційні показники [1, 2], у перспективі мають сягати 100 %. Цикл зварювальних робіт є проміжним під час виготовлення виробів; якість з’єднань, з рештою однакових умов, зумовлюється дотриманням нормативних вимог до початкових умов складання деталей – стан поверхні, матеріал, геометрія, взаємне позиціонування, установчими параметрами зварювального обладнання; характером перебігу термодформаційного процесу формування зварної зони (плинні технологічні показники процесу та закон їх зміни і розподілу у часі зварювання).

Хоча процес контактного точкового мікрозварювання має певні ознаки саморегулювання [3], глибина компенсації збурень є недостатньою для запобігання утворення дефектів. Отже, слід визнати, що забезпечення заданої 100 % якості для всієї партії зварних з’єднань тільки за рахунок саморегулювання процесу є неможливим.

Високі експлуатаційні вимоги, які висуваються до електронних та точних приладів, передбачають використання на різних стадіях їх виробництва різноманітних і надійних методів контролю якості зварювання: а) руйнування при випробовуванні з’єднань технологічних зразків або готових зварних виробів – контроль є обов’язковим при відпрацюванні технологічних режимів зварювання, а також відбірковому тестуванні партій виробів та аналізі причин катастрофічної зміни показників якості налагодженого технологічного процесу виготовлення зварної продукції; б) без руйнування готової продукції (неруйнівний контроль НК) – при встановлених суворих кореляційних залежностях між експлуатаційними параметрами виробу та оцінними критеріями якості, без порушення цілісності самого виробу під час реалізації процедури контролю; є обов’язковим для всієї маси виробів.

Найбільш перспективним вважається застосування як методів НК параметрів точкового зварювання, що мають точну статистичну кореляційну залежність від розмірів зони розплавлення, і принципово дають змогу виявити дефект або на стадії виготовлення виробу, або в окремому технологічному циклі контролю якості [3].

Показниками якості стадії зварювання виробу є відгуки зони зварювання: електричні (динамічний гальванічний опір, спад напруги, струм та їх інтегральні аналоги); теплові (термографічні, термоелектричні, дилатаційні); механічні (динаміка зміни зусилля стискання, переміщення рухомих мас силового контуру машини).

За відсутності зворотних зв'язків з установчими параметрами режиму вони відбивають розвиток рівня дефектності у разі порушення технології зварювання, а при виявленому жорсткому кореляційному зв'язку з показниками експлуатаційної надійності виробу дають змогу прогнозувати його працездатність.

Визнається [4], що зовнішні за відношенням до зони зварювання електричні параметри – зварювальний струм, спад напруги між електродами, опір зони зварювання, а також їх інтегральні показники – енергія та потужність зони зварювання – мають певну інформативність стосовно процесів, які відбуваються під час формування зварного з'єднання.

Проте аналіз їх застосування показниками якості режиму зварювання демонструє: а) забезпечення якості виробу за струмом (амплітудне значення струму) може бути достовірним параметром контролю лише при значній тривалості розряду та умові незмінності зусилля стискання електродів. Останнє через втрату механічної стійкості зварюваного металу при високих температурах і в момент розплавлення не виконується. Для підвищення результативності контролю додатково необхідно жорстко задавати форму та амплітуду струму у часі розряду. Проте основним дестабілізуючим фактором у надійності результатів контролю є різні значення перехідних опорів у зоні зварювання, які залежать від стану поверхонь контактування, зміни лінійних розмірів деталей; б) регулювання якості за напругою – встановлено, що цей показник не є надійним оцінним параметром, оскільки для широкої гами виробів не виявлена однозначна залежність з міцністю з'єднання. Спад напруги, з рештою однакових умов, залежить від зусилля стискання та часу зварювання. Із зростанням зусилля стискання спад напруги зменшується незначною мірою, проте помітно спадає під час зростання часу розряду. Наше осцилографування спаду напруги у міжелектродній зоні свідчить, що її величина різко змінюється на початку розряду. Додатково слід відзначити [5], що для забезпечення якісних показників зварювання важливим є не стабілізація спаду напруги на середньому рівні, а незмінність її складових на кожному опорі міжелектродної зони, що може бути забезпечене лише незмінністю стану контактних поверхонь, зусилля стискання, площі контактування електродів і деталей; в) значення гальванічного опору – однозначної залежності динаміки його зміни та показників міцності не спостерігається для всієї гами мікрозварних виробів [5], оскільки для забезпечення надійних оцінок контролю необхідне реагування на кожен складову опору зони електрод-електрод; г) потужність імпульсу зварювання – при точно заданому часі зварювання, навіть при коливанні зусилля стискання, амплітудне значення потужності залишається незмінним і принципово може визначати якість з'єднання. Із зростанням часу зварювання амплітудне значення потужності спадає. Оскільки для конденсаторних машин час розряду залежить не тільки від параметрів розрядного контуру (реактанс контуру), а також зміни динаміки опору зони зварювання, оцінка якості за потужністю стає непевною; д) енергія зварювального імпульсу – не залежить від зміни зусилля стискання. Із зростанням часу зварювання енергія збільшується, проте динаміка її зміни залежить, з рештою рівних умов, від теплофізичних характеристик деталей і електродів. Такий параметр регулювання та відслідковування якості зварювання враховує зміну потужності, контактного опору і часу зварювання, тобто є найбільш придатним, у конкретних випадках, для регулювання зварювального процесу. Проте для конденсаторного зварювання важливим є не тільки врахування потужності, підведеної до зони зварювання, але й відповідної до неї потужності, необхідної та достатньої для формування зварної точки. Останнє означає, що інтегральна характеристика процесу за електричними параметрами (енергія зварювального імпульсу) має бути оцінена зо окремими її складовими роботи струму на опорах та змінних товщинах деталей, затиснутих між електродами.

Переміщення електродів під час нагрівання та розплавлення певного об'єму металу супроводжується, при зміні його агрегатного стану, різкою зміною як зусилля стискання, так і вектора лінійного переміщення рухомих мас силового контуру машини. Отже, переміщення верхнього електрода від ефекту теплового розширення металу найповніше характеризує розвиток ядра. Вважається, що кінематичні характеристики руху пропорційні середній миттєвій температурі у зварюваному контакті та не залежать від розкиду значень контактного переходу електрод-деталь [4, 6]. З погляду забезпечення надійності сигналу важливим є отримання максимального переміщення

рухомих мас, для чого є бажаним режим зварювання із мінімальним укоріненням електродів у деталі та незначні зусилля стискання, чому сприяють жорсткі режими зварювання. Прояв переміщення має часову інерцію, залежну від жорсткості режиму зварювання, механічних характеристик матеріалу, форми деталей, механічних параметрів силового контуру машини тощо.

З усіх відомих контрольованих параметрів режиму зварювання переміщення рухомого електрода машини має найвищий рівень кореляції зі зміною діаметра ядра та проплавленням деталей [7]. Варто зауважити, що із зменшенням товщини зварюваних деталей чутливість методу спадає. Твердження є справедливим у зварюванні площинних деталей, проте для комбінації площина-циліндр, циліндр-циліндр, площина-рельєф не є критичним, через особливості деформування біля-контактних зон та самих деталей, а також взаємного укорінення останніх [8, 9]. Це підтверджується особливостями перебігу термодформаційного циклу формування зварної литої зони деталей типу циліндр-циліндр [10]: а) процес супроводжується значним осаджуванням дротів та інтенсивним розвитком початкової площини контактування; б) деформаційні процеси через імпульсне прикладання струму та інерційність механізму стискання запізнені відносно теплових; в) через утворення відкритої зони плавлення процес є схильним до утворення виплесків. Похідні від переміщення – швидкість та прискорення верхнього електрода, з рештою однакових умов, при малих товщинах деталей, мають значення достатні для їх впевненої реєстрації (рис. 1).

Проте такі оцінні показники процесу несуть достовірну інформацію про кінцеві розміри литої зони лише з умови незмінності часу зварювання. При наявності ефектів саморегулювання, що обмежено спостерігається у конденсаторному розряді, якість з'єднання, оцінена за такими показниками, не гарантується [7].

Аналіз реальних осцилограм демонструє, що максимальне прискорення виникає у початковій момент зрушення верхнього електрода, а у момент найбільшого зміщення електрода у зворотньому напрямку спадає до нуля або при енергетиці процесу, достатньої для ініціації виплеску, може набувати від'ємне значення.

Метою роботи є виявлення таких плинних електричних та механічних показників формування зварного з'єднання термогальванічних дротів у робочий контакт, які дозволяють неруйнівний 100 % контроль за наявністю щільного та достовірного кореляційного зв'язку між механічними характеристиками виробу.

Відповідно під час розв'язання такої задачі з'являється можливість спрямованої корекції технологічного процесу за двома напрямками: а) керування енергетикою процесу; б) керування механічними плинними параметрами (динаміка, осаджування).

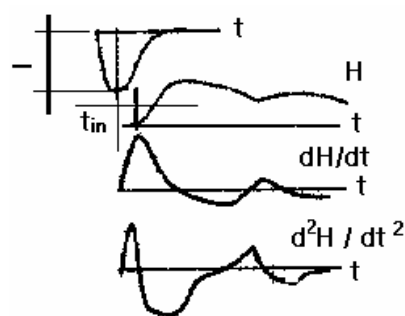


Рис. 1. Осцилограми електричних та механічних процесів, що відбуваються в часі формування мікроточкового зварного з'єднання.  
 $I$  – струм;  $H$  – переміщення верхнього електрода;  $dH/dt$ ,  $d^2H/dt^2$  – відповідно, швидкість та прискорення переміщення;  $t_{in}$  – часове запізнення механічних процесів

Електричні показники – амплітудне значення струму зварювання  $I_A$ , спад напруги між електродами  $U_A$ , відповідний амплітудному значенню струму, час його досягнення  $t_A$ , загальний час розряду  $t_r$  хоча безпосередньо не пов'язані із фізичним станом металу в місці формування з'єднання, проте є основними складовими раціонального циклу зварювання [8], який забезпечує

оптимальні вимоги до зварного виробу. Вказані електричні параметри, таким чином, принципово дозволяють непрямо, з певним наближенням, давати висновки про стан литої зони, а, відповідно, судити про якість зварного з'єднання. Додатковим позитивним моментом щодо їх використання в якості контрольних параметрів є можливість надійного вимірювання.

Для з'ясування можливості використання характеристик зварювального імпульсу струму як оцінних параметрів неруйнівного 100 % контролю зварних точкових мікроз'єднань і однозначно пов'язаних із надійністю зварної точки, що оцінюється зусиллям її механічного руйнування, використані дані оптимізуючого планованого експерименту на базі матриці плану В-В4 (Vox-Benkin) (див. таблицю)

#### Відгуки експериментальної оптимізації процесу зварювання

№	I <sub>A</sub> , А	U <sub>A</sub> , мВ	t <sub>A</sub> , мс	t <sub>p</sub> , мс	P <sub>p</sub> , ДаН	Примітка
1	270	500	1,8	10	0,030	
2	300	600	1,2	6	0,015	
3	160	350	1,8	10	0	Відсутність зварювання
4	180	400	1,2	5	0,010	
5	320	650	1,5	6,5	0,007	
6	310	900	1,0	4	0,070	
7	200	500	1,2	7	0,005	
8	240	600	0,8	3,5	0,040	
9	240	500	1,6	10	0,15	Привласнене значення через руйнування виробу при знятті з привареного нижнього електрода
10	240	750	1,5	5,5	0,120	
11	120	450	0,9	10	0,080	
12	140	450	0,8	6	0,050	
13	300	750	1,8	7	0,120	
14	360	1100	1,0	4	0,020	
15	180	550	1,2	7	0,080	
16	200	800	0,8	4	0,075	
17	280/290	1400/1500	1,8/2,0	10/9,8	0,060/0,055	Ядро плану експерименту
18	200/210	1000/1500	2,0/1,8	9/8	0,100/0,120	
19	220/200	1100/1000	0,8/1,0	8/7,8	0,070/0,080	
20	280/300	1400/1500	1,0/1,2	5,5/5,7	0,120/0,130	
21	250/270	1250/1350	1,5/1,7	7,0/7,2	0,080/0,070	
22	170/180	850/900	1,3/1,5	7,0/7,3	0,040/0,050	
23	240/220	1200/1100	1,8/1,6	8,0/8,5	0,070/0,060	
24	240/250	1200/1250	1,2/1,4	5,0/5,3	0,090/0,080	

Запис характеристик струму зварювання проводився осцилографом з подовженим післясвітінням С1-49, масштабні коефіцієнти запису: струму  $m_i = 100$  А/под, напруги  $m_U = 50$  мВ/под,  $m_t = 1$  мс/под. Для вимірювання струму використаний власний пік-трансформатор ( $\omega_2 = 9000$ , відносна магнітна проникність осердя  $\mu_0\mu_a = 1$ ) з пасивним інтегруючим RC-ланцюжком (стала інтегрування 1 мс).

Для обробки результатів експериментів використані процедури методу найменших медіан (МНМ), найменших квадратів (МНК), в тому числі графоаналітичні [13], розрахунок рівня кореляційного зв'язку – відповідно процедури [11, 12].

Кореляція між  $j$ -м показником раціонального циклу зварювання та  $y$ -відгуком зусилля руйнування становить

$$r = \frac{1}{S_x S_y} \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad (1)$$

а лінійна регресійна модель загального вигляду становить

$$(x_j - \bar{x}_j) = r \frac{S_x}{S_y} (y - \bar{y}), \quad (2)$$

де  $\bar{x} = (1/n)\sum x_i$ ,  $x_i$  – досліджуваний показник раціонального циклу зварювання,  $y_i$  – зусилля руйнування зварного з'єднання (випробовування на розрив) для  $i$ -ї точки ядра плану;  $S_x$ ,  $S_y$  – відповідні дисперсії.

Результати обробки експериментальних даних за вищезазначеними процедурами наведені на рис. 2–5 та свідчать: а) часові показники імпульсу струму інваріантні або рівень їх кореляції становить не більше 23 % до зміни руйнівного зусилля при механічних випробовуваннях; б) для всього масиву матриці експерименту аналогічна ситуація присутня щодо електричних параметрів; тільки в ядрі плану (область квазіоптимуму) спостерігається лінійна кореляція, що коректно описується моделями вигляду

$$\begin{aligned} P_p &= 2,2 \cdot 10^{-4} U_A - 0,2399, \quad r = 0,577 \\ P_p &= 2,6 \cdot 10^{-4} I_A + 0,087, \quad r = 0,403 \end{aligned} \quad (3)$$

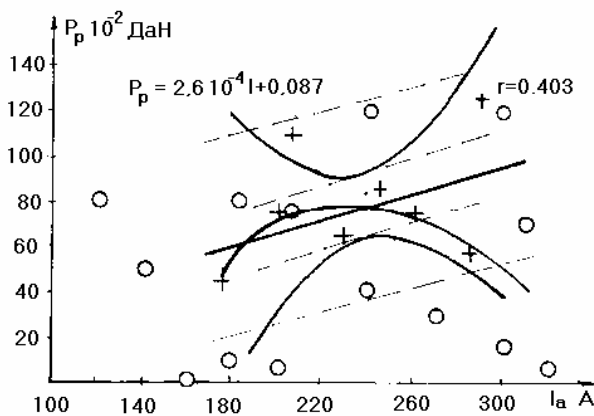


Рис. 2. Дослідження функціонального зв'язку між плинними параметрами режиму зварювання та механічною міцністю зварного контакту термопарі ПР6/ПР30 (діаметр дротів 70+100 мкм).  $P_p = f(I_a)$ ;  $I_a$  – амплітуда струму зварювання; — — лінія регресії для точок центра (+) плану (квазіоптимум); -- -- лінія регресії для масиву точок (°) плану

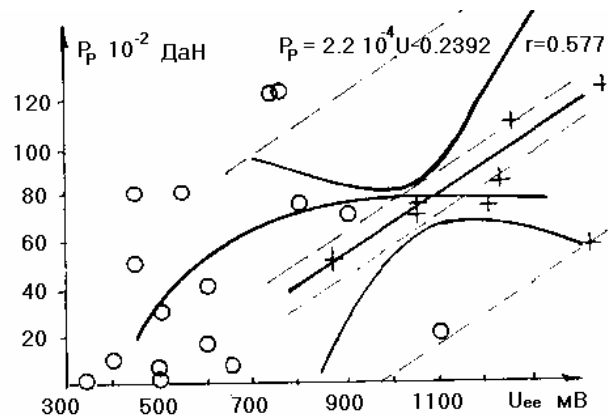


Рис. 3. Дослідження функціонального зв'язку між плинними параметрами режиму зварювання та механічною міцністю зварного контакту термопарі ПР6/ПР30. Діаметр дротів 70+100 мкм;  $P_p = f(U_{ee})$ ;  $U_{ee}$  – амплітудне значення спаду напруги між електродами

Оскільки визначені значення кореляції не відповідають умові інформативної надійності Шеннона [12] ( $r \geq 0,86$ ), то слід визнати, що параметри раціонального циклу зварювання, запропоновані як оціночні показники надійності зварного з'єднання і достатні для неруйнівного контролю всієї маси виробів, є непридатними.

Під час формування зварного з'єднання змінюється агрегатний стан металу деталей виробу. Отже, для контролю та регулювання якістю процесу доцільно використовувати фізичні ефекти, які відбивають наявність та розміри зони взаємного розплавлення. Одним із таких ефектів є теплове розширення металу, що проявляється у переміщенні рухомих мас (верхнього електрода) машини в усьому інтервалі формування зварного з'єднання.

Відсутність серійного обладнання для реєстрації такого переміщення для мікрозварювання точкових з'єднань (інерційна маса пристрою повинна бути щезаючи малою порівняно з масою рухомих елементів силового механічного контуру машини), а також певні обмеження, пов'язані, власне, з впливом контуру на можливість адекватної реєстрації зміни просторового положення

верхнього електрода під дією термодформаційного циклу зварювання; неоднозначність відомих результатів оцінювання якості з'єднань за таким показником, особливо при зварюванні тонкого металу [3, 14], не дозволяють беззастережно прийняти цей показник як універсальний та достовірний для неруйнівного контролю точкових мікрозварних з'єднань.

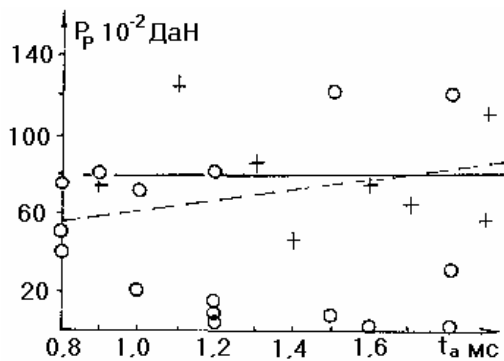


Рис. 4. Дослідження функціонального зв'язку між плинними параметрами режиму зварювання та механічною міцністю зварного контакту термопари ПР6/ПР30 (діаметр дротів 70+100 мкм).  $P_p=f(t_a)$  ( $t_a$  – час досягнення амплітудного значення струму зварювання (— лінія регресії для точок центра (+) плану (квазіоптимум); -- лінія регресії для масиву точок (o) плану)

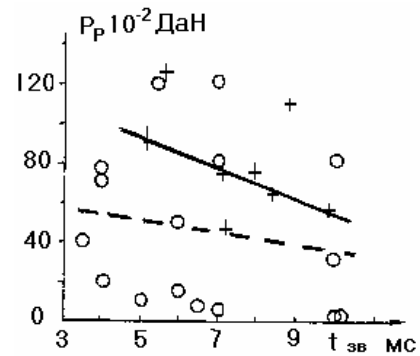


Рис. 5. Дослідження функціонального зв'язку між плинними параметрами режиму зварювання та механічною міцністю зварного контакту термопари ПР6/ПР30 (діаметр дротів 70+100 мкм).  $P_p=f(t_{z3})$  ( $t_{z3}$  – час зварювання)

Проте осцилографування електричних та механічних плинних параметрів циклу зварювання (рис. 6) дозволяє зробити припущення про наявність між ними функціонального зв'язку, що, при підтвердженні висунутої гіпотези, забезпечує точність результатів сумісного неруйнівного контролю якості виробу як за електричними, так механічними параметрами процесу зварювання.

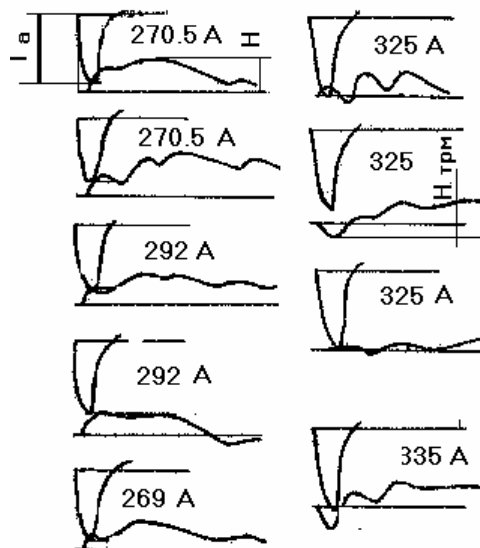


Рис. 6. Осцилограми електричних та механічних процесів при зварюванні робочого контакту термопар ПР6/ПР30 (діаметр дротів 70+100 мкм); I – струм зварювання; H – осаджування деталей у зоні формування зварного з'єднання

Оброблення експериментальних даних за процедурами МНМ дозволило висунути гіпотезу  $H_0$ : про два можливі види коректного опису даних (рис. 7).

$$\begin{aligned} H &= aI_A^n ; \\ H &= a \exp(I_A b) , \end{aligned} \quad (4)$$

де  $H$  – переміщення верхнього електрода машини (еквівалент осаджування деталей під дією термодформаційного циклу зварювання);  $a, b, n$  – коефіцієнти.

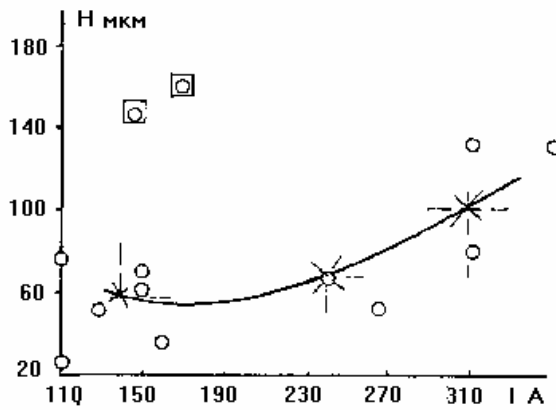


Рис. 7. Залежність кінцевої висоти зварних дрітів у зоні зварювання  $H$  від амплітудного значення струму зварювання  $I_A$

Стандартні процедури лінеаризації дослідних даних [12], що описуються таким функціональним зв'язком (рис. 8, а, б), не відкидають гіпотези про строгість опису залежності величини осаджування дрітів у зоні зварювання від струму зварювання у вигляді експоненціальної функції. Чисельний її розв'язок у координатах графіка лінійного перетворення (рис. 8, б) становить

$$H = 1.34 \exp(13 \cdot 10^{-4} I_A) \quad [H - \text{мм}, I - \text{А}] \quad (5)$$

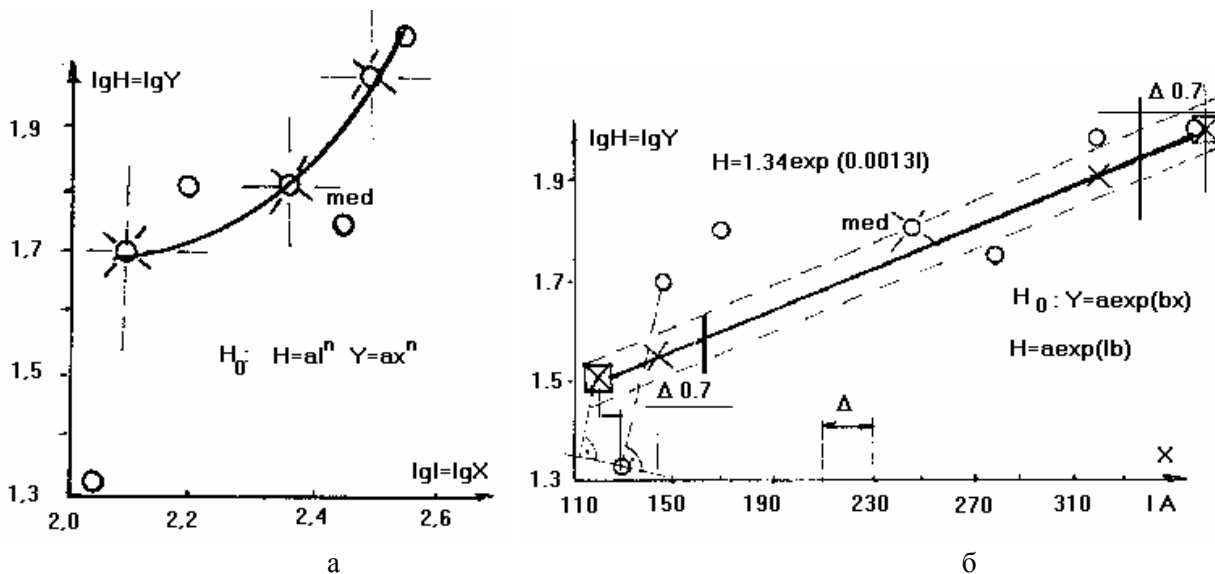


Рис. 8. Перевірка гіпотез про вид функціонального зв'язку між амплітудним значенням струму зварювання та кінцевою висотою зварного контакту:  
а – степенева функція; б – експоненціальна функція;  
med – розбудова лінії регресії за методом найменших медіан;  
 $\Delta$  – розбудова лінії регресії за методом найменших квадратів

Проте наявність аномальних точок на графіку функціональної залежності (рис. 7) та різний характер прояву переміщення рухомих мас (рис. 6,  $I_A = 325$  А), де, в одному випадку (рис. 6), чітко спостерігається ефект теплового розширення металу (ТРМ) (динамічна крива руху верхнього електрода має позитивне значення у часі розгортки), а в інших випадках, ефект ТРМ не спостерігається (зразу фіксується спрямоване осаджування дротів у зоні зварювання), не дозволяє при даному масиві експериментальних даних отримати однозначний висновок про можливість відслідковування величини осаджування дротів у зоні зварювання за значенням амплітуди струму зварювання.

**Висновки:** 1. Плинні параметри технологічного процесу зварювання – електричні та їх часові показники не можуть бути використані в якості оціночних показників міцності виробу, оскільки навіть в області квазіоптимальних режимів зварювання мають низьке значення кореляційного зв'язку – за струмом на рівні 0,403, за напругою між електродами – 0,574. 2. При утворенні мікрозварних контактних з'єднань деталей типу циліндр-циліндр на серійному обладнанні чітко проявляється ефект переміщення рухомих мас силового контуру машини (верхній електрод), однозначно пов'язаний функціональним зв'язком з амплітудним значенням струму зварювання.

1. *Материалы высокотемпературной термометрии / И.П. Куритный, Г.С. Бурханов, Б.И. Стадник. – М.: Металлургия, 1986. – 206 с.* 2. *Данишевский С.К., Сведе-Швец Н.И. Высокотемпературные термометры. – М.: Металлургия, 1977. – 231 с.* 3. *Красулин Ю.Л., Назаров Г.В. Микросварка давлением. – М.: Металлургия, 1976. – 160 с.* 4. *Орлов Б.Д., Чулошников П.Л., Верденский В.Б. и др. Контроль точечной и роликовой электросварки. – М.: Машиностроение, 1973. – 304 с.* 5. *Янушенко В.А. Выбор параметра для регулирования и контроля процесса контактной точечной сварки // Электронная техника. Серия 5. "ПУЛ". Вып. 1(16). Институт Электроники. – М. 1975. – 135 с.* 6. *Козловский С.Н. Контроль и регулирование процесса контактной точечной сварки // Неразрушающий контроль и системы управления качеством сварн. и паян. соед. – М.: Знание, 1992. – С. 64–66.* 7. *Строев В.И., Иванов Н.И., Самсонов И.Л. Управление процессом контактной сварки малогабаритных деталей с открытой зоной образования соединения // Электротехническая промышленность, Электросварка. – 1983. – № 6. – С. 17–18.* 8. *Вопросы повышения качества микросварных соединений в радиоэлектронике / Под ред. В.Э. Моравского. – К.: Знание, 1974. – 40 с.* 9. *Белобородченко В.И. Оценка качества изготовления контактных групп реле // Динамика, прочность и проектирование машин и приборов. – 1989. – № 230. – С. 3–5.* 10. *Krause H.-J., Lehtkuhl V. Measuring the dynamic mechanical characteristics of spot and projection welding machines-measured parameters, measuring procedures and initial results.- Schweissen und Schneiden. – 1984. – 18–23. – № 1. E.7-E.10.* 11. *Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.* 12. *Новицкий П.В., Зограф И.Л. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.* 13. *Кенуй М.Г. Быстрые статистические вычисления / Пер. с англ. – М.: Статистика, 1979. – 69 с.* 14. *Орлов Б.Д. Проблемы контроля при контактной сварке // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. "Проблемы совершенствования контактной сварки", 22–24 сен. 1987 г. – Псков, 1987. – С. 68–71.*