

## Визначення залишкових напружень в електроіскрових покриттях

М. П. Бережницька<sup>а</sup>, О. В. Паустовський<sup>б</sup>, С. М. Кириленко<sup>б</sup>, Ю. В. Губін<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

<sup>б</sup> Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ, Україна

*Запропоновано методику визначення осьових залишкових напружень у призматичних стрижнях прямокутного перерізу, що дозволяє досліджувати напружений стан у поверхневих шарах як однорідних, так і неоднорідних стрижнів із покриттями.*

**Ключові слова:** внутрішні напруження, електроіскрове покриття, стравлення поверхневого шару, тензодатчик, додаткові напруження, модуль пружності.

**Вступ.** Нанесення розплавленого електродного матеріалу на холодну деталь при електроіскровому легуванні призводить до формування в утвореному покритті розтягуючих залишкових напружень 1-го роду [1]. Ці напруження значно впливають на механічні властивості покриттів і є одним із факторів, що зумовлюють обмеження їх товщини [2].

У процесі розробки нових електродних матеріалів для електроіскрового легування важливим є вивчення закономірностей формування залишкових напружень та глибини їх залягання. Найпростіші методи їх визначення – механічні. За методом Давиденкова, визначення внутрішніх напружень проводиться через вимірювання прогину зразка при безперервному стравлюванні покриття за формулою [3]

$$\sigma = \frac{Ea^2}{3b^2} K \frac{df}{dt}, \quad (1)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу;  $a$  – товщина зразка;  $b$  – половина товщини зразка;  $K$  – відношення масштабів запису по осях  $X$  та  $Y$ ;  $df/dt$  – тангенс кута нахилу дотичної, проведеної до кривої прогину в даній точці.

Метод успішно застосовується для визначення напружень по товщині однокомпонентного матеріалу, але незручний при використанні для зразків із покриттям. При використанні методу потрібно враховувати модуль пружності матеріалу, який в матеріалах покриття і основи може відрізнятися. Цю різницю в значенні модуля Юнга враховують наступним чином:

$$E = E_o \frac{\alpha + \beta}{2} + E_{\pi} \left( 1 - \frac{\alpha + \beta}{2} \right), \quad (2)$$

де  $E_o$  і  $E_{\pi}$  – модулі пружності матеріалів основи та покриття;

$$\alpha = \left( \frac{1 - 2h_U}{a - U} \right)^3; \quad \beta = \left[ 1 - \frac{2(h_U - U)}{a - U} \right]^3;$$

$h_U$  – товщина покриття;  $U$  – половина товщини стравленого шару, тобто потрібно враховувати товщину покриття і його модуль пружності.

При нанесенні зносостійкого твердосплавного покриття на сталь електроіскровим методом відбувається кавітаційне перемішування твердосплавних продуктів ерозії електрода з основним матеріалом [4]. Утворюється новий композит, модуль Юнга якого часто невідомий, і в формулу підставляється наближене значення, що призводить до значної похибки.

**Методика експерименту.** У роботі зроблено спробу розробити метод визначення внутрішніх напружень в електроіскрових покриттях, який би спростив процес і не давав великих відхилень від істинних значень. Розглянемо зразок у вигляді паралелепіпеда. У поверхневих шарах поверхні, що оброблялася, утворилися внутрішні напруження  $\sigma_0$ . Вважаємо, що вони постійні вздовж зразка. По перерізу ці напруження врівноважуються протилежними напруженнями в глибині зразка. Знімаємо поверхневий шар із напруженнями, що еквівалентно дії на частину, що залишається, напружень протилежного знака, які спричиняють розтяг (стиск) цієї частини. Визначимо осьові залишкові напруження  $\sigma_0(\delta_i)$ , що діють у поверхневому шарі на глибині  $\delta_i$ . Якщо знімаємо цей шар, то в частині, що залишилася, з'являються додаткові напруження  $\sigma_d(\delta_i)$ . Тоді напруження в шарі, що знаходиться на відстані  $\delta_i$  від поверхні ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ), будуть такі:

$$\sigma(\delta_i) = \sigma_0(\delta_i) + \sigma_d(\delta_i), \quad (3)$$

звідки дійсні залишкові напруження

$$\sigma_0(\delta_i) = \sigma(\delta_i) - \sigma_d(\delta_i). \quad (4)$$

Напруження  $\sigma(\delta_i)$  знаходимо наступним чином. Знімаємо тонкий шар  $d\delta_i$  (рис. 1), що еквівалентно дії зусилля

$$dP(\delta_i) = \sigma(\delta_i) b d\delta_i \quad (5)$$

та моменту згину

$$dM(\delta_i) = 1/2(h - \delta_i) \sigma(\delta_i) b d\delta_i, \quad (6)$$

де  $b$  – ширина стрижня.

У нижньому крайньому волокні стрижня виникають напруження розтягу та згину:

$$d\sigma_c = \frac{dP(\delta_i)}{F(\delta_i)} - \frac{1/2(h - \delta_i)dM(\delta_i)}{I(\delta_i)}, \quad (7)$$

де  $F(\delta_i) = b(h - \delta_i)$  та  $I(\delta_i) = \frac{b(h - \delta_i)^3}{12}$  – відповідно площа та момент інерції перерізу стрижня після зняття шару  $\delta_i$ .

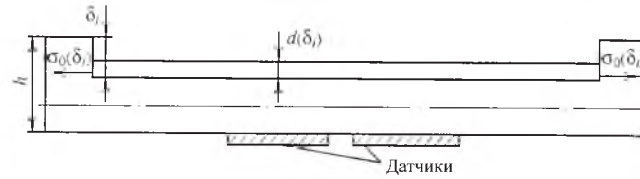


Рис. 1. До визначення осевих залишкових напружень у призматичному стрижні.

Підставимо значення  $dP(\delta_i)$ ,  $dM(\delta_i)$ ,  $F(\delta_i)$  та  $I(\delta_i)$  в формулу (7) і отримаємо

$$d\sigma_c = -\frac{2\sigma(\delta_i)d\delta_i}{h - \delta_i}, \quad (8)$$

звідки

$$\sigma(\delta_i) = -\frac{h - \delta_i}{2} \frac{d\sigma_c}{d\delta_i}. \quad (9)$$

Аналогічно знаходимо додаткові напруження  $\sigma_d(\delta_i)$ . Якщо на відстані  $\delta_{i-1}$  від поверхні зніmemo шар  $d\delta_{i-1}$ , то в шарі  $\delta_i$ , що знаходиться від нейтральної площини згину на відстані  $1/2(h + \delta_{i-1} - 2\delta_i)$ , виникнуть напруження розтягу та згину:

$$\begin{aligned} d\sigma_d &= \frac{dP(\delta_{i-1})}{F(\delta_{i-1})} - 1/2(h + \delta_{i-1} - 2\delta_i) \frac{dM(\delta_{i-1})}{I(\delta_{i-1})} = \\ &= \frac{1}{h - \delta_{i-1}} \sigma(\delta_{i-1})d\delta_{i-1} - \frac{3(h + \delta_{i-1} - 2\delta_i)}{(h - \delta_{i-1})^2} \sigma(\delta_{i-1})d\delta_{i-1}. \end{aligned} \quad (10)$$

Напруження  $\sigma(\delta_{i-1})$  в шарі  $\delta_{i-1}$  після зняття усіх попередніх шарів можна знайти за формулою (9). Тоді

$$d\sigma_d = -\frac{1}{2} \frac{(4h + 2\delta_{i-1} - 6\delta_i)}{h - \delta_{i-1}} \frac{d\sigma_c}{d\delta_{i-1}} d\delta_{i-1}, \quad (11)$$

звідки додаткові напруження в шарі на глибині  $\delta_i$  після зняття попередніх шарів будуть

$$\sigma_d(\delta_i) = \int_0^{\delta_i} d\sigma_d = -\frac{1}{2} \int_0^{\delta_i} \frac{4h - 6\delta_i + 2\delta_{i-1}}{h - \delta_{i-1}} \frac{d\sigma_c}{d\delta_{i-1}} d\delta_{i-1}. \quad (12)$$

При інтегруванні по частинах отримаємо

$$\sigma_d(\delta_i) = -2\sigma_c(\delta_i) + 3(h - \delta_i) \int_0^{\delta_i} \frac{\sigma_c(\delta_{i-1})}{(h - \delta_{i-1})^2} d\delta_{i-1}. \quad (13)$$

Підставимо значення основних напружень  $\sigma(\delta_i)$  із формули (9) та додаткових напружень із формули (13) в (4) і визначимо дійсні залишкові напруження у шарі на відстані  $\delta_i$  від поверхні зразка:

$$\sigma_0(\delta_i) = -\frac{h - \delta_i}{2} \frac{d\sigma_c}{d\delta_i} + 2\sigma_c(\delta_i) - 3(h - \delta_i) \int_0^{\delta_i} \frac{\sigma_c(\delta_{i-1})}{(h - \delta_{i-1})^2} d\delta_{i-1}. \quad (14)$$

Напруження  $\sigma_c(\delta_i)$ , що виникають при послідовному зніманні поверхневих шарів  $\delta_i$ , визначають експериментально.

На рис. 2 подано схему навантаження стрижня з тензодатчиками. На відстані  $a$  від кінців стрижня згинальний момент у поперечних перерізах постійний ( $M = Pa = \text{const}$ ), і напруження в них змінюються за лінійним законом:

$$\sigma_c = Cf(P), \quad (15)$$

де  $C$  – постійний коефіцієнт, що описує геометричні характеристики досліджуваного стрижня. Після зняття шарів напруження

$$\sigma_c = A_i\varphi, \quad (16)$$

де  $A_i$  – зміна опору тензодатчиків, що фіксується мікроамперметром після зняття шару  $\delta_i$ ;  $\varphi$  – кут нахилу тарувальної прямої.

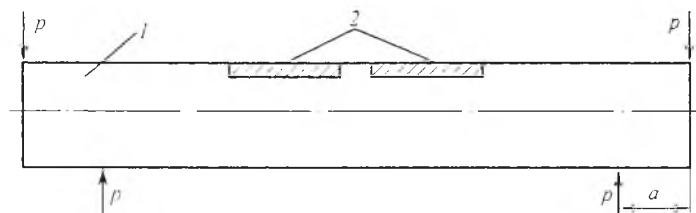


Рис. 2. Схема навантаження стрижнів (1) із тензодатчиками (2).

Для вимірювання опору використовують мостову схему, що складається з двох плечей. Кожне плече має два тензодатчики: робочий і термокомпенсаційний. Робочий наклеюється на зразок. Термокомпенсаційний теж наклеюється на зразок, який знаходиться в електроліті, але не травиться. Це необхідно для усунення впливу температури на опір тензодатчика, яка в процесі травлення може змінюватися. Травлення проводять автоматично, підтримуючи стабільний анодний струм для одержання постійної швидкості травлення. За цією швидкістю визначають товщину стравлюваного шару. Для електрохімічного травлення зразків із покриттям можна використовувати два електроліти: один для стравлювання покриття, інший для стравлювання основи зразка. У процесі стравлювання шарів  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  отримують ряд значень напружень  $\sigma_c(\delta_1), \sigma_c(\delta_2), \dots, \sigma_c(\delta_n)$ , які підставляють у формулу (14) і знаходять залишкові напруження.

Якщо товщина покриття значно менша за товщину зразка, то додаткові напруження будуть незначними. Наприклад, покриття, нанесені твердим сплавом методом електроіскрового легування, мають товщину, як правило, кілька десятків мікрометрів. Це приблизно на два порядки менше, ніж товщина всього зразка. На практиці зручним є використання зразків товщиною 3–6 мм, шириною 8–15 мм і довжиною 100–150 мм. Відповідно, додаткові напруження  $\sigma_d$  будуть досить малими і ними можна знехтувати, використовуючи для підрахунків більш просту формулу (9).

**Результати експерименту.** Розроблену методику використовували для визначення залишкових напружень у покриттях, отриманих електроіскровим легуванням. На зразки зі сталі У8 (товщина  $h = 4,86$  мм; ширина  $b = 8,20$  мм; довжина  $l = 150$  мм) наносили твердосплавне покриття товщиною 30–35 мкм електродним матеріалом ВКЗУ на установці “ЭФИ-46А”. (Енергія імпульсу становила 0,38 Дж).

На обезжирену поверхню, протилежну обробленій, наклеювали тензодатчики типу ФКПА20-200х, які тарували на установці “РОН” [5]. Потім пошарово стравлювали покриття за допомогою електролітів. Для покриття використовували “холодний” електроліт – розчин сірчаної та азотної кислоти у дистильованій воді, для сталі – водний розчин солей сірчаноокислого цинку та хлористого натрію. На основі результатів експерименту та даних про швидкості травлення покриття й основи зразка будували залежність  $y = \sigma_c(\delta_i)$ , обчислювали похідну й інтеграл за допомогою методу параболічної апроксимації та правила трапеції [6]. Щоб отримати залежності  $y = \sigma_c(\delta_i)$ , досліджували три-чотири зразки. Розрахунок напружень представлено в таблиці. Нанесення твердосплавного покриття шляхом електроіскрової обробки спричинило виникнення залишкових напружень розтягу з максимумом на межі покриття та основи зразка. Епюри залишкових напружень у покритті та на межі його з основою, незалежно за якою формулою – (9) чи (14) вони визначалися, майже збігаються (рис. 3). Із ростом товщини стравлюваного шару різниця між графіками 1 і 2 стає істотною.

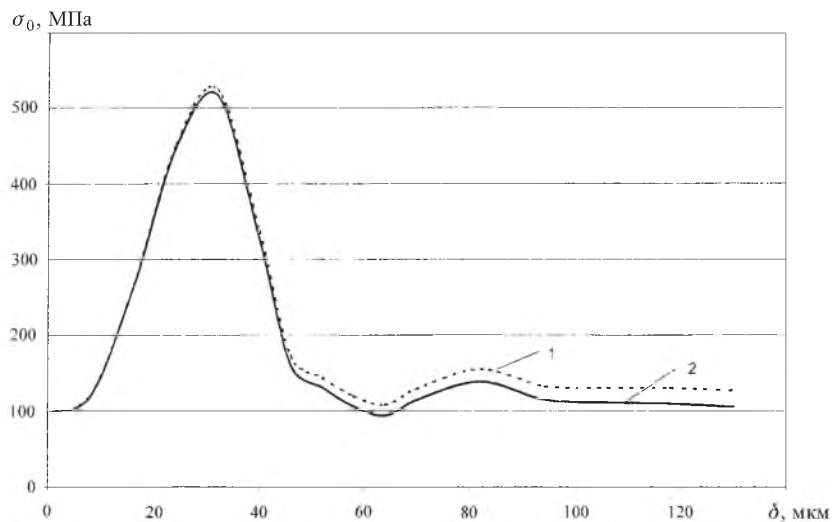


Рис. 3. Епюри залишкових напружень по товщині покриття, отримані за формулами (9) – 1 і (14) – 2.

Розрахунок напружень по товщині зразка

$i$	$\delta_i$	$\sigma_c(\delta_i)/10$ , МПа	$\frac{d\sigma_c}{d\delta_i}$	$h - \delta_i$ , мм	$(h - \delta_i)/2$ , мм	$\sigma_c(\delta_i)^*$ , МПа	$2\sigma_c(\delta_i)^*$ , МПа	$-3(h - \delta_i)\int \dots^*$ , МПа	$\sigma_o(\delta_i)$ , МПа
0	0,000	0,000	-4,000	4,850	2,425	97,000	0,000	0,000000	97,000
1	0,008	-0,036	-5,000	4,842	2,421	121,050	-0,720	0,000089	120,330
2	0,016	-0,080	-11,000	4,834	2,417	265,870	-1,600	0,000377	264,270
3	0,024	-0,212	-18,750	4,826	2,413	452,437	-4,240	0,001102	448,199
4	0,032	-0,380	-21,750	4,818	2,409	523,958	-7,600	0,002572	516,360
5	0,040	-0,560	-14,024	4,810	2,405	337,273	-11,200	0,004910	326,078
6	0,046	-0,606	-7,167	4,804	2,402	172,143	-12,120	0,007086	160,030
7	0,052	-0,646	-6,000	4,798	2,399	143,940	-12,920	0,009423	131,029
8	0,058	-0,678	-5,000	4,792	2,396	119,800	-13,560	0,011894	106,252
9	0,064	-0,706	-4,500	4,786	2,393	107,685	-14,120	0,014479	93,579
10	0,070	-0,732	-5,389	4,780	2,390	128,794	-14,640	0,017165	114,172
11	0,082	-0,822	-6,500	4,768	2,384	154,960	-16,440	0,022975	138,543
12	0,094	-0,888	-5,583	4,756	2,378	132,772	-17,760	0,029373	115,041
13	0,106	-0,956	-5,500	4,744	2,372	130,460	-19,120	0,036279	111,376
14	0,118	-1,020	-5,500	4,732	2,366	130,130	-20,400	0,043685	109,774
15	0,130	-1,088	-5,392	4,720	2,360	127,247	-21,760	0,051593	105,539

Примітка. Зірочкою відмічено відповідні складові напружень у формулі (14).

**Висновки.** При знятті тонких шарів (до 50 мкм) додаткові напруження нехтувально малі, і залишкові напруження можна визначити за формулою (9), в той час як при знятті більших товщин додаткові напруження стають значно більшими, і дійсні залишкові напруження бажано визначати за формулою (14).

Даний метод дозволяє уникнути використання модуля пружності покриття та товщини останнього, що значно спрощує процес визначення напружень і зменшує похибку.

## Резюме

Предложена методика определения осевых остаточных напряжений в призматических стержнях прямоугольного сечения, что позволяет исследовать напряженное состояние в поверхностных слоях как однородных, так и неоднородных стержней с покрытиями.

1. Паустовський О. В., Бережницька М. П., Кириленко С. М. Залишкові напруження після електроіскрового легування інструментальних сталей // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – № 5. – С. 109 – 110.
2. Кириленко С. Н., Верхотуров А. Д., Безыкорнов А. И. Остаточные напряжения в нанесенном электроискровым методом слое в зависимости от температуры отпуска исходных образцов // Порошк. металлургия. – 1985. – № 4. – С. 21 – 23.
3. Бабичев М. А. Методы определения внутренних напряжений в деталях машин. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 132 с.
4. Кириленко С. Н. Разработка спеченных электродных материалов из карбидотитановых и карбидовольфрамовых сплавов для электроискрового легирования стали с последующей дополнительной обработкой: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1989. – 18 с.
5. Бабей Ю. И., Бережницкая М. Ф., Каличак Т. Н., Череватюк В. А. Установка для определения остаточных напряжений первого рода // Информ. листок № 82-01. – Львов: ЦНТИ УкрНИИИТИ Госплана УССР, 1981.
6. Бабей Ю. И., Бережницкая М. Ф. Метод определения остаточных напряжений первого рода. – Львов, 1980. – 66 с. – (Препр./АН УССР. Физ.-мех. ин-т, № 30).

Поступила 19. 06. 2002