

УДК620.17

**Є.В. Колесник**, канд. техн. наук

**Д.О. Федін**, канд. техн. наук

**І.М. Жезняковський**, магістрант

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпропетровськ, Україна

### **ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЕЛЕКТРООСАДЖЕНИХ ПОКРИТТЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЬНОГО ЗРАЗКА**

**Е.В. Колесник**, канд. техн. наук

**Д.А. Федин**, канд. техн. наук

**И.М. Жезняковский**, магистрант

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепропетровск, Украина

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРООСАЖДЕННЫХ ПОКРЫТИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНОГО ОБРАЗЦА**

**Yevhen Kolesnyk**, PhD in Technical Sciences

**Dmytro Fedin**, PhD in Technical Sciences

**Ivan Zhezniakovskiy**, Master's Degree student

SHEI «Ukrainian State University of Chemical Technology», Dnipropetrovsk, Ukraine

### **DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN ELECTRODEPOSITED COATINGS WITH THE USE OF A MODEL SAMPLE**

*Запропоновано простий за реалізацією метод визначення залишкових напружень в електроосаджених покриттях з використанням модельного зразка, в якому наявність ізолюючого шару на зворотному боці зразка не має негативного впливу на точність одержуваного результату. Метод застосовано для визначення залишкових напружень в електроосаджених залізних покриттях.*

**Ключові слова:** залишкові напруження, електроосаджені покриття, модельний зразок.

*Предложен простой в реализации метод определения остаточных напряжений в электроосажденных покрытиях с использованием модельного образца, в котором наличие изолирующего материала на обратной стороне образца не имеет негативного влияния на точность получаемого результата. Метод использован для определения остаточных напряжений в электроосажденных железных покрытиях.*

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, электроосажденные покрытия, модельный образец.

*It is suggested a simply realizable method for determination of residual stresses in electrodeposited coatings with the use of model sample, in which presence of insulating layer on the opposite side of a sample doesn't have negative influence*

on the accuracy of the result being obtained. This method was used for determination of residual stresses in electrodeposited iron coating.

**Key words:** residual stresses, electrodeposited coatings, model sample.

**Постановка проблеми.** У сучасному машинобудуванні постійно набувають розповсюдження деталі машин та елементи конструкцій, виготовлені з матеріалів, вкритих різними видами захисних покриттів, зокрема електроосадженими металевими покриттями, що зменшують тертя, підвищують зносостійкість та корозійну стійкість, а також додатково виконують декоративну функцію з покращення зовнішнього вигляду виробів.

Істотний вплив на технологічні та експлуатаційні властивості металевих покриттів має наявність залишкових напружень, які виникають у процесі нанесення або деяких видів оброблення покриттів. Так, для покриттів, які отримані способом електроосадження, переважно характерний високий рівень залишкових напружень, що зумовлено наявністю спрямованої дії на матеріал, який формується, потоку іонів металу в електроліті в напрямі катода (виробу, що покривається). В результаті такого впливу відбувається спотворення кристалічної решітки покриттів і в матеріалі виникають макронапруження, які підпорядковуються закону Гука та врівноважуються в об'ємі всього виробу або більшої його частини.

Наявність залишкових напружень може негативно впливати на конструкційну міцність покриттів, викликати зміну розмірів при подальшому обробленні, змінювати електрохімічний потенціал, прискорюючи корозію. У зв'язку з цим експериментальне дослідження залишкових напружень в електроосаджених покриттях та розроблення відповідних методів дослідження є досить актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз літературних джерел показав, що методи експериментальних досліджень залишкових напружень в електроосаджених покриттях відрізняються різноманітністю. Огляд основних методів, устаткування та методів розрахунку величини напружень наведено в роботах [1–4]. Найбільш розповсюдженими є механічні методи визначення напружень, характерними та достатньо простими представниками яких є метод гнучкого катода та метод спірального катода [2].

За методом гнучкого катода (Хоур, Ероусміт) у нижній частині кювети з електролітом розміщується затискач, до якого кріпиться катод у вигляді тонкої пластини, ізолюваний із зворотного боку лаком. Верхній кінець катодної пластини виступає на 3–4 см над рівнем електроліту та за допомогою освітлювача через об'єктив проєкціюється на шкалу. Під час осадження покриттів із внутрішніми напруженнями розтягнення катодна пластина разом із покриттям вигинається у сторону анода, а при стисканні – у протилежному напрямку. За вимірюваною величиною прогину в подальшому розраховують внутрішні напруження за формулою [2]

$$\sigma = \frac{E_K \cdot S_K^2 \cdot y}{3 \cdot l^2 \cdot S}, \quad (1)$$

де  $E_K$  – модуль пружності катода;

$S_K$  – товщина катода;

$S$  – товщина покриття;

$l$  – довжина катода;

$y$  – відхилення вільного кінця катода від початкового положення.

За методом спірального катода (Бренер та Сендерофф) метал осаджується на зовнішню сторону катода у вигляді стрічки, яка завита у спіраль та поміщена у циліндричний анод, а внутрішня сторона катода ізолюється лаком. Залежно від знаку внутрішніх напружень спіраль закручується або розкручується на певний кут  $\varphi$ . Вимірювану куту деформацію спіралі використовують для розрахунку внутрішніх напружень за формулою [2]

$$\sigma = \frac{E_K \cdot S_K \cdot \varphi}{12 \cdot \pi \cdot R \cdot n \cdot S}, \quad (2)$$

де  $\varphi$  – кут закручування спіралі;

$R$  – радіус спіралі;

$n$  – кількість витків спіралі.

Слід зазначити, що подібні методи, згідно з якими вимірюють деформацію зразка після нанесення покриттів і за її рівнем, враховуючи константи пружності основи, обчислюють величину напружень, використовують також для інших видів покриттів. Такі методи, наприклад [5–7], дещо відрізняються методиками розрахунку, які постійно вдосконалюються, але, звичайно, також можуть бути використані і для електроосаджених покриттів.

У розглянутих методах гнучкого і спірального катода у випадку набухання ізолюючого лаку виникає паразитна деформація. Використання інших методів розрахунку напружень за величиною деформації зразка також потребує нанесення лаку з одного боку, що зменшує точність одержуваних результатів. Спроба обійтись без лаку привела до розроблення інших методів визначення залишкових напружень [1; 2]. Деякі з них дають відносно велику похибку через зміну геометрії катода, інші дозволяють одержати достатню точність, але потребують використання досить складного допоміжного обладнання у складі експериментальних установок – важільно-оптичних систем, високочутливих датчиків-механотронів, тензорезисторів [2] або застосування принципово інших методів вимірювання залишкових напружень – лазерної інтерферометрії [2] або рентгєнівських методів [8; 9], які відрізняються високими капітальними та експлуатаційними витратами.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Недолік багатьох відомих механічних методів визначення залишкових напружень в електроосаджених покриттях полягає в недостатній достовірності результатів, що зумовлене наступним. Під час одержання зразків покриттів, призначених для визначення залишкових напружень, осадження здійснюється з одного боку основи, що приводить до її деформації після нанесення покриття, за величиною якої розраховують залишкові напруження. При цьому інший бік основи ізолюється від контакту з електролітом за допомогою лаку, полімерної стрічки або інших матеріалів, які не проводять електричний струм. Безумовно, наявність ізолюючого матеріалу впливає на пружні властивості зразків, особливо при електроосадженні на тонку жерсть або фольгу. Однак у відомих методах не передбачене врахування наявності ізолюючого матеріалу, яким нехтують у розрахунках, використовуючи лише пружні константи матеріалу основи, що приводить до зменшення достовірності одержуваних результатів визначення залишкових напружень.

**Мета статті.** Метою роботи стало розроблення простого за реалізацією та достовірного методу визначення залишкових напружень в електроосаджених покриттях, в якому наявність ізолюючого шару на зворотному боці зразка не впливала би на результат, або впливала би мінімально.

**Виклад основного матеріалу.** Спираючись на результати попередників, як первинну інформацію щодо залишкових напружень в електроосаджених покриттях у методі, що розроблявся, використано вимірюваний прогин зразка, тобто відхилення кінця гнучкого катода від його прямолінійного положення, що утворюється в результаті електроосадження металу.

Для підвищення достовірності результатів визначення напружень та запобігання впливу ізолюючого шару на зворотному боці зразка запропоновано використання додаткового модельного зразка, а метод визначення залишкових напружень у цьому випадку полягає в наступному.

На стрічковий металевий зразок (катод) з одного боку наклеюють ізолюючу полімерну стрічку або ізолюють захисним шаром лаку, а з іншого боку осаджують покриття на ділянці довжиною  $l$ , яку вимірюють від краю зразка. Після нанесення покриття вимірюють його прогин  $y_1$  відносно початкового прямолінійного положення. Потім допоміжний (модельний) зразок без покриття, ідентичний за розмірами та ізолюючим шаром одержаному зразку з покриттям, у горизонтальному положенні жорстко закріплюють одним кінцем таким способом, щоб за межі кріплення виходила ділянка довжиною  $l$ . До іншого кінця зразка прикладають вантаж, масу якого підбирають так, щоб величина прогину модельного зразка  $y_2$ , що утворюється при такому навантаженні, дорівнювала би величині прогину  $y_1$  (рис.). Далі, виходячи з маси, що утворює прогин  $y_2 = y_1$ , розраховують величину напружень у модельному зразку та приймають їх значення як величину залишкових напружень в одержаному покритті.

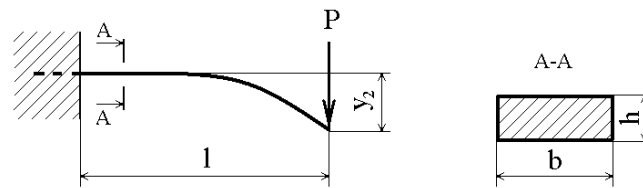


Рис. Схема навантаження модельного зразка

При відносно невеликому прогині визначення величини напружень зводиться до відомого з опору матеріалів розв'язання задачі розрахунку на міцність під час згинання балки із защемленим кінцем [10].

У цьому випадку максимальні напруження у зразку обчислюють за формулою

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W}, \quad (3)$$

де  $M_{\max}$  – максимальний згинальний момент;

$W$  – осьовий момент опору поперечного перерізу.

Для обраної схеми максимальний згинальний момент обчислюють, як

$$M_{\max} = P \cdot l = m \cdot g \cdot l, \quad (4)$$

де  $P$  – вага вантажу;

$m$  – маса вантажу;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$l$  – довжина робочої ділянки.

Для обраного зразка із прямокутним перерізом осьовий момент опору розраховують за формулою

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (5)$$

де  $b$  – ширина зразка;

$h$  – товщина зразка.

Тоді, підставляючи формули (4) та (5) в (3), отримуємо остаточний вираз для розрахунку максимальних напружень:

$$\sigma_{\max} = \frac{6 \cdot m \cdot g \cdot l}{b \cdot h^2}. \quad (6)$$

За результатами роботи одержано патент [11] на спосіб визначення залишкових напружень в електроосаджених покриттях.

Застосування запропонованого методу для визначення залишкових напружень в електроосаджених залізних покриттях завтовшки 150 мкм на сталевій основі (сталь 08 кп) з розмірами робочої ділянки 20×0, 25×50 мм показало, що величина напружень становить близько 170 МПа. Детальний склад електроліту та параметри процесу електроосадження, а також характеристики залізних покриттів наведено в роботах [12–14]. Для порівняння було виконано традиційні розрахунки залишкових напружень за методом гнучкого катода [2] за формулою (1) та за методом визначення залишкових напружень у полосових заготовках з покриттям за кривизною зразка [5], які не враховують наявність ізолюючого шару на зворотному боці зразка. Одержані значення напружень становлять близько 135 та 95 МПа відповідно. На думку авторів, застосування запропонованого методу дозволяє одержати більш достовірний результат через відсутність впливу на нього ізолюючого шару, що зумовлене використанням модельного зразка.

**Висновки і пропозиції.** Розроблено простий за реалізацією метод визначення залишкових напружень в електроосаджених покриттях з використанням модельного зразка, в якому наявність ізолюючого шару на зворотному боці зразка не має негативного впливу на точність одержуваного результату. Метод включає вимірювання прогину зразка після електроосадження покриття, навантаження вантажем ідентичного модельного зразка без покриття до забезпечення такого ж прогину і подальше обчислення напружень як відношення максимального згинального моменту до осевого моменту опору зразка без покриття.

#### Список використаних джерел

1. *Dini J. W.* Electrodeposition: the materials science of coatings and substrates / J. W. Dini. – Westwood, NJ, USA : Noyes Publications, 1993. – 367 p.
2. *Ковенский И. М.* Металловедение покрытий / И. М. Ковенский, В. В. Поветкин. – М., 1999. – 211 с.
3. *Perakh M.* Determination of spontaneous macrostress in deposits by means of restraining/ restoring force version of strip-bending and spiral-twisting / M. Perakh // *Surface Technology*. – 1976. – № 4. – P. 565–588.
4. *Perakh M.* Calculation of spontaneous macrostress in deposits from deformation of substrates and from restoring (or restraining) force factors / M. Perakh // *Surface Technology*. – 1979. – № 8. – P. 265–309.
5. *А.с. 1805307.* Способ определения остаточных напряжений в полосовых заготовках / Колмогоров Г. Л. ; опубл. 30.03.1993, Бюл. № 12. – 2 с.
6. *Пат. UA28383.* Спосіб визначення структурних і температурних складових залишкових напружень в покриттях / В. С. Антонюк, О. Б. Сорока, С. А. Клименко, М. Ю. Копейкіна ; опубл. 10.12.07, Бюл. № 20. – 3 с.
7. *Пат. CN101477030.* Measuring method for residual stress in coating / Binshi Xu, Xiancheng Zhang, Haidou Wang; Yixiong Wu. ; опубл. 08.07.2009. – 12 p.
8. *Горелик С. С.* Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – М. : МИСИС, 2002. – 358 с.
9. *Пат. RU2349907.* Рентгеновский способ прямого измерения упругих макронапряжений в поверхностном слое поликристаллических материалов и измерительный образец для его реализации / Кочаров Э. А. ; опубл. 20.03.2009, Бюл. № 8. – 8 с.
10. *Писаренко Г. С.* Сопротивление материалов / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський. – К. : Вища школа, 1979. – 696 с.
11. *Пат. UA80584.* Спосіб визначення залишкових напружень в електроосаджених покриттях / Колесник Є. В., Федін Д. О. ; опубл. 10.06.13, Бюл. № 11. – 3 с.
12. *Колесник Е. В.* Морфология поверхности железа, электроосажденного из сульфатного электролита / Е. В. Колесник, В. И. Овчаренко // *Теория и практика металлургии*. – 2011. – № 5–6, ч. 2. – С. 99–102.

13. *Колесник Е. В.* Влияние плотности тока на кристаллографическую текстуру электроосажденного железа / Е. В. Колесник, М. Т. Величко // *Металознавство та термічна обробка металів.* – 2011. – № 3. – С. 26–30.

14. *Колесник Е. В.* Изменение совершенства кристаллографической текстуры по толщине электроосажденных железных покрытий / Е. В. Колесник // *Металлофизика и новейшие технологии. Спецвыпуск.* – 2011. – С. 401–406.