

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 621.181.7

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ СУШІННЯ  
ОБМАЗКИ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДІВ

О. Ю. Співак, Л. А. Боднар, К. О. Іщенко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ СУШКИ  
ОБМАЗКИ СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

А. Ю. Спивак, Л. А. Боднар, К. А. Ищенко

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DRYING KINETICS  
COATING OF WELDING ELECTRODES

O. Spivak, L. Bodnar, K. Ishchenko

*Експериментально досліджено процес сушіння обмазки зварювальних електродів в промислових камерних конвективних печах ДО-13.23.13/200. Розглянуто вплив параметрів сушильного агента, таких як температура та відносна вологість на швидкість сушіння капілярно-пористих матеріалів та зміну їх вологовмісту. Визначено вплив швидкості процесу сушіння на якість готового продукту. Отримано криву сушіння та графічну кінетичну залежність зміни інтенсивності випаровування за постійної температури сушильного агента. Розроблена методика одержання аналітичної залежності, що описує зв'язок між відносним вологовмістом капілярно-пористої сировини, якою є обмазка електродів і швидкістю її сушіння.*

**Ключові слова:** експериментальне дослідження, сушіння, зварювальний електрод, конвективна піч, сушильний агент, капілярно-пористий матеріал, температура, відносна вологість, вологовміст, випаровування, обмазка електрода.

*Експериментально досліджено процес сушки обмазки сварочных электродов в промышленных камерных конвективных печах ДО-13.23.13/200. Рассмотрено влияние параметров сушительного агента, таких как температура и относительная влажность на скорость сушки капиллярно - пористых материалов и изменение их влагосодержания. Определено влияние скорости процесса сушки на качество готового продукта. Получены кривая сушки и графическая кинетическая зависимость изменения интенсивности испарения при постоянной температуре сушительного агента. Разработана методика получения аналитической зависимости, описывающей связь между относительным влагосодержанием капиллярно-пористого сырья, которым является обмазка электродов и скоростью её сушки.*

**Ключевые слова:** экспериментальное исследование, сушки, сварочный электрод, конвективная печь, сушительный агент, капиллярно-пористый материал, температура, относительная влажность, влагосодержание, испарения, обмазка электрода.

*We have studied experimentally the drying of coated welding electrodes for industrial chamber convection ovens ДО-13.23.13/200. We also have studied how drying agent parameters, such as temperature and relative humidity, influence the rate of capillary-porous material drying. We have determined the effect of drying rate on the quality of the finished product. Drying curve and the kinetic graphic dependence of evaporation intensity have been obtained. We have developed procedure to obtain the analytical dependence between the relative moisture content of capillary-porous raw material such as electrodes coating and the rate of its drying.*

**Keywords:** experimental study, drying, welding electrode, convection oven, drying agent, capillary-porous material, temperature, humidity, moisture, evaporation, daub electrode.

### Вступ. Постановка проблеми

Термообробку електродів проводять з метою надання покриттю достатньої механічної міцності при вмісті в ньому води в межах, що сприяють нормальному протіканню зварювального процесу, який дозволяє забезпечити заданий хімічний склад і властивості наплавленого металу і зварних з'єднань.

Повний цикл термообробки включає попереднє сушіння, сушіння, прожарювання та охолодження. Безпосередньо після опресування електродів вологість покриття зазвичай становить 9-13 %. Допустимий вміст води після прожарювання залежить від виду покриття. Прийнято вважати, що електроди з основним покриттям повинні мати вологість не більше 0,2 % маси покриття. Вологість визначають при температурі  $400 \pm 10$  °C з доведенням навески покриття до постійної маси. Для забезпечення зазначеної вологості електроди слід прожарювати при високих температурах (360-400 °C) досить тривалий час [1].

Разом з тим, неякісно виконана операція сушіння обмазки перед прокалюванням може призвести до браку готової продукції.

Сушіння капілярно-пористих матеріалів, яким є обмазка електродів відрізняється тривалістю процесу і для вибору оптимального режиму роботи промислового сушильного обладнання досить часто необхідно визначати тривалість сушіння конкретної сировини за певних зовнішніх умов. Розрахункові залежності, що використовуються для знаходження видатності сушарки та вибору режимних параметрів процесу сушіння, потребують використання величин, прийнятих заздалегідь у вигляді заданих значень, або розраховуються за емпіричними рівняннями. Дані рівняння не враховують ряд властивостей пористих матеріалів, таких як розмір пор, їх форма, зміна теплопровідності та теплоємності матеріалу в процесі сушіння, швидкість нагріву і сушіння сировини. Найточніші вихідні дані, необхідні для проектування роботи обладнання, можна отримати лише в результаті експерименту на натурному продукті, за заданих умов проведення процесу сушіння. Тож експеримент є найбільш надійним методом визначення кінетичних залежностей процесу сушіння.

### Формулювання мети досліджень

Метою даної роботи є експериментальне дослідження впливу окремих параметрів сушильного процесу на швидкість сушіння і якість готової висушеної продукції.

### Основна частина

Зовнішніми параметрами процесу сушіння є значення температури, швидкості і вологовмісту сушильного агента. В роботі експериментально досліджувалась кінетика і динаміка процесу сушіння обмазки зварювальних електродів в камерних конвективних сушильних промислових печах типу ДО-13.23.13/200.

На рис. 1 показана зміна параметрів сушильного агента і відносної вологості сировини в процесі сушіння. Дані залежності дозволяють визначити градієнт температури по товщині (радіусу) обмазки. З графіка також видно, що процес прогріву садки електродів триває приблизно 40-45 хвилин, в цей же час відбувається адіабатне випаровування вільної води з поверхні обмазки електродів.

Регресійний аналіз експериментальних даних в середовищі Mathcad дозволяє отримати криву сушіння, з якої видно, що вона має класичний для капілярно-пористих тіл, яким є обмазка електродів, вигляд (рис. 2). Крива розділена на три частини: зону прогріву, зону з постійною та зону з падаючою швидкістю сушіння. Зона прогріву виражена дуже слабо, що можна пояснити тим, що випаровування води з покриття ускладнюється утриманням води в капілярах за рахунок сил поверхневого натягу і утрудненою дифузією пари і води з глибини покриття по тонких капілярах.

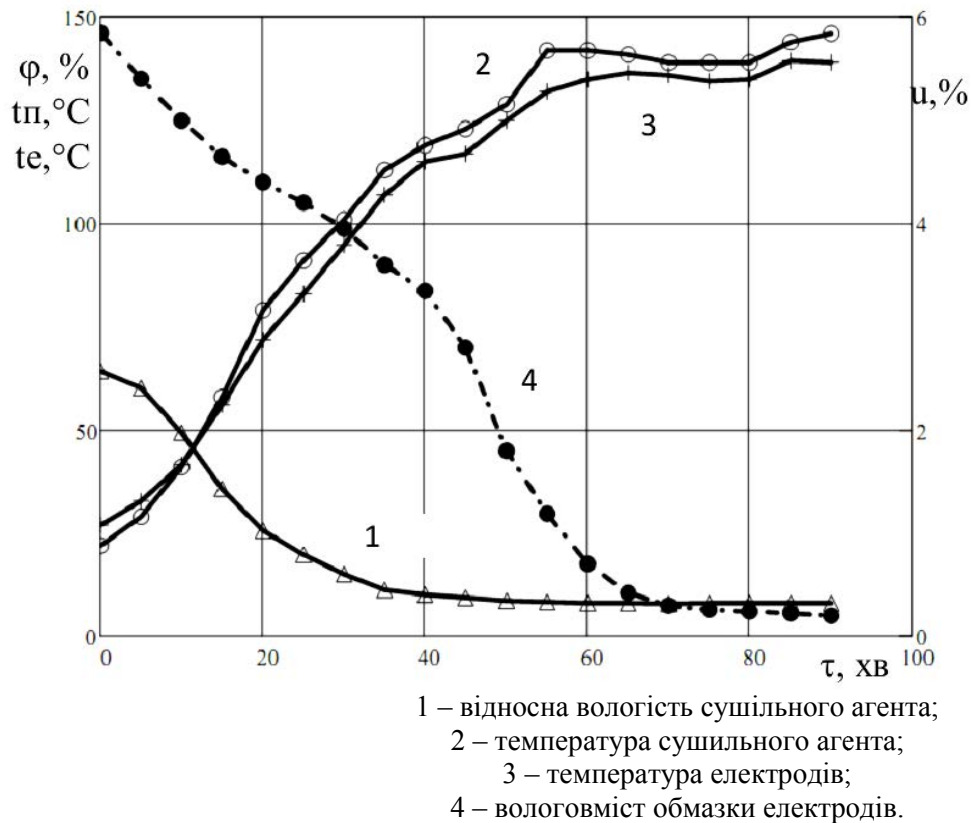


Рис. 1. Зміна відносної вологості, температури сушільного агента, температури електродів і вологості обмазки в процесі сушіння

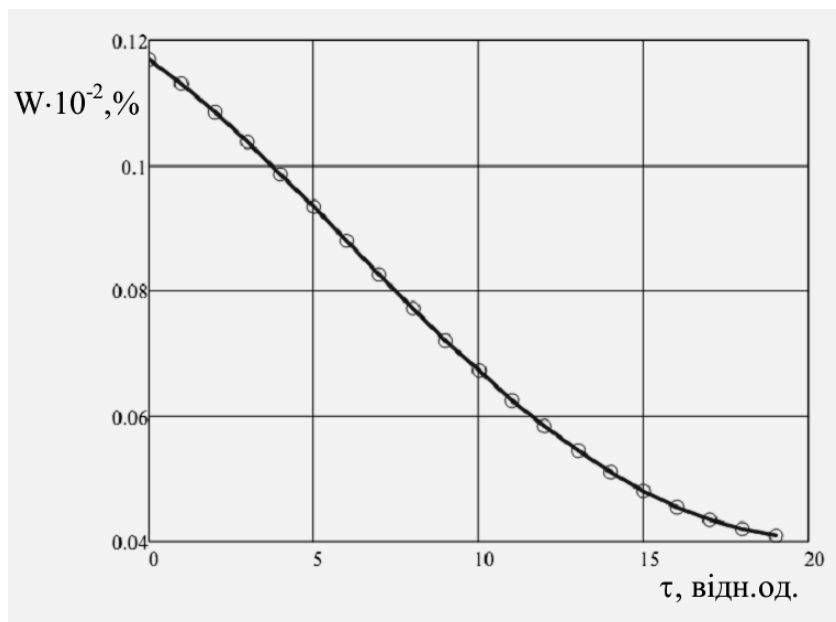


Рис. 2. Крива сушіння обмазки електродів

У перші моменти сушіння, коли в поверхневому шарі покриття волога знаходиться в нерівноважному стані (тиск парів води в повітрі менше тиску пари в поверхневому шарі маси), волога буде випаровуватися з капілярів. Спочатку буде випаровуватися вільна волога, слабо пов'язана з міцелами, що призведе до підвищення концентрації розчину силікату в даному місці. Різниця концентрацій буде викликати дифузію.

Майже вільна волога буде дифундувати в зовнішні шари. У початковий момент сушіння за наявності незначного градієнта температур цьому руху вологи будуть перешкоджати капілярні

сили, оскільки в капілярі відбувається рух від більш нагрітого місця капіляра до менш нагрітого.

Аналіз кривої сушіння показує, що вона має класичну для капілярно-пористих тіл структуру: зону прогріву, зону сушіння з постійною швидкістю (перший період сушіння) і зону сушіння з падаючою швидкістю (другий період сушіння).

В першому періоді вираз для швидкості сушіння можна записати у вигляді

$$N_0 = -\left(\frac{dW}{d\tau}\right)_0 = \text{const}, \quad (1)$$

де  $W$  – відносна вологість сировини;

$\tau$  – тривалість сушіння.

В другому періоді швидкість сушіння визначається формулою

$$N = -\left(\frac{dW}{d\tau}\right) = \chi \cdot N_0 \cdot (W - W_p), \quad (2)$$

де  $\chi$  – відносний коефіцієнт сушіння, 1%;

$W_p$  – рівноважна вологість сировини.

Зазначимо, що інтегрування рівняння (2) за початкових умов, що відповідають початку другого періоду сушіння, дозволяє отримати експоненційну залежність між вологістю матеріалу і часом сушіння [2].

Зміна інтенсивності процесу сушіння  $\left(I = \frac{dN}{d\tau}\right)$  при цьому подана на рис. 3.

При рівномірному прогріванні покриття встановиться певний градієнт вологості, що призводить до дифузії вологи з ділянок з більшою вологістю. Швидкість дифузії вологи буде тим більшою, чим інтенсивніше видаляється насичена водяна пара з поверхні покриття та з капілярів. Тому при охолодженні електродів нагрітим повітрям поверхня випаровування буде перемішатися в глиб покриття. Це буде тривати до тих пір, поки не видалиться вся капілярна волога.

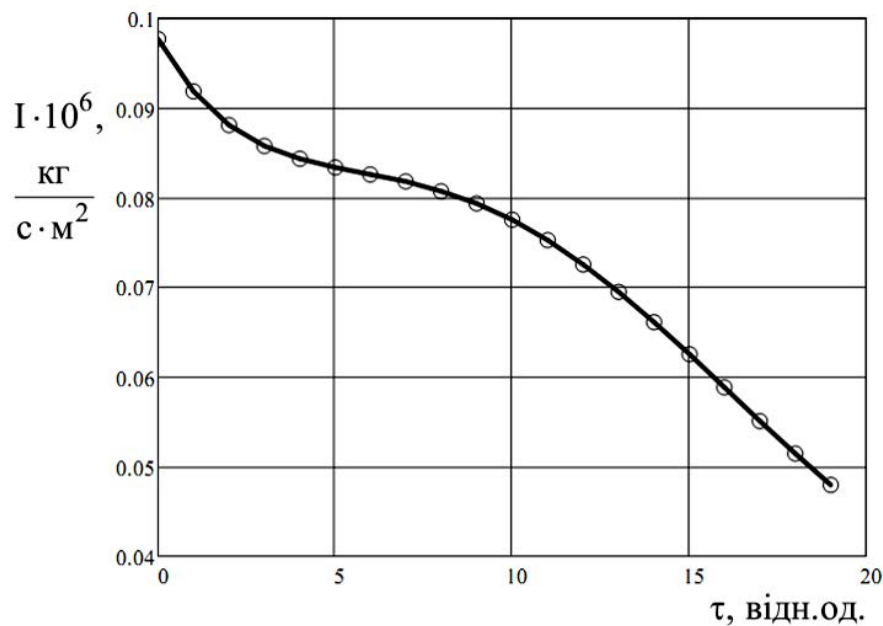


Рис. 3. Інтенсивність сушіння обмазки електродів

На видалення капілярної, майже вільної вологи, накладається процес видалення вологи, більш міцно пов'язаної з колоїдними частинками силікатів. Така волога починає видалятися при більш високих температурах. Чим вище міцність зв'язку молекул води з колоїдними частинками,

тим при більш великих температурах це відбудеться. Міцність зв'язку вологи визначається модулем і видом застосованого рідкого скла, а кількість зв'язаної вологи в основному залежить від кількості сухого залишку рідкого скла. Підвищення температури сушильного агента при цьому вкрай небажане, оскільки існує досить висока небезпека перетворення частини капілярної вологи в пару безпосередньо в капілярах. Водяна пара з підвищеним тиском не встигне пройти через капіляр, внаслідок чого обмазка може тріскатись, або навіть відшарувуватись від поверхні самого електрода цілими областями (спухати).

На рис. 4 наведена крива кінетики сушіння в процесі нагріву виробів сушильним агентом постійної температури.

Якщо виразити вологовміст обмазки і тривалість сушіння в безрозмірному вигляді, то рівняння, що описує залежність швидкості сушіння, показане на рис. 4, може бути подане в такому вигляді [3].

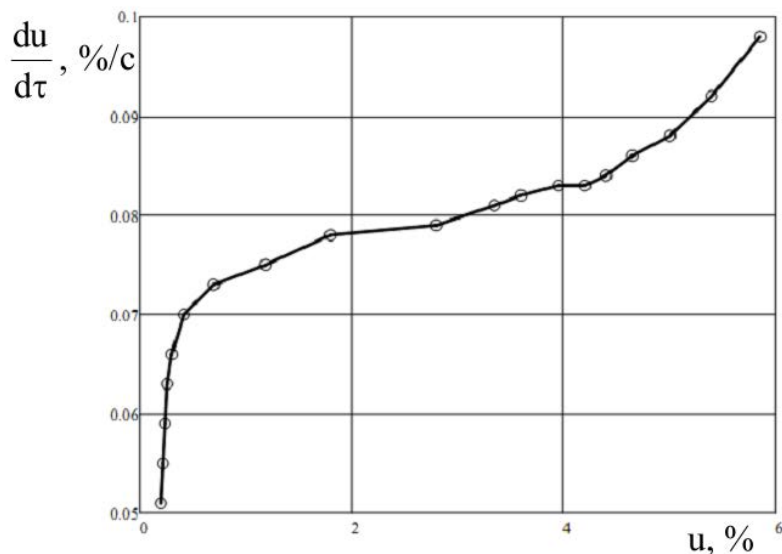


Рис. 4. Залежність швидкості сушіння від вологовмісту матеріалу

$$\frac{du}{d\vartheta} = 4,596u^2 - 4,381u + 0,054, \quad (3)$$

де  $u$  – нормований вологовміст, відн. од;

$\vartheta$  – безрозмірний час.

Коефіцієнт кореляції при цьому складає 0,923.

### Висновки

- Швидкість сушіння електродів однієї марки знаходиться в зворотній залежності від товщини покриття і визначається двома чинниками.
- Енергія, необхідна для видалення вологи при сушінні нагрітим повітрям, надходить через поверхню покриття. При збільшенні товщини площа поверхні покриття електрода зростає повільніше, ніж маса покриття. Тому на одиницю маси покриття в одиницю часу надходить менша кількість енергії.
- Випаровування вологи відбувається з різних шарів, поступово поглиблюючись в товщу покриття. У результаті, водяна пара, що утворюється всередині покриття, повинна пройти по капілярах довший шлях, тому при жорстких режимах сушіння (з початковими температурами вище 100 °С), як правило, спостерігається надмірне спухання покриття електродів.
- При швидкому нагріванні покриття частина вологи з його поверхні випаровується, а частина по капілярах переміщається в глибинні холодні шари. Потім, коли покриття прогріється, парціальний тиск пари, що утворюється усередині покриття, може перевищити атмосферний тиск. Тому попереднє сушіння повинне відбуватися при помірній температурі, починаючи з

60 °С, з повільним її підвищенням до 80-90 °С. Після втрати 30-40 % вологи рівномірно по товщині покриття електродів температуру можна піднімати вище 100 °С.

#### **Використана література**

1. Китаев А. М. Дуговая сварка / А. М. Китаев. – М.: Машиностроение, 1979. – 240 с.
2. Фролов В. Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / В. Ф. Фролов. – Л.: Химия, 1987. – 208 с.
3. Левина Н. С. Исследование кинетики нагрева и сушки пористых материалов / Н. С. Левина // Ползуновский вестник. – 2008. – № 1, 2. – С. 49-52.

**Співак Олександр Юрійович** – к.т.н., доцент кафедри теплоенергетики Вінницького національного технічного університету.

**Боднар Лілія Анатоліївна** – к.т.н., ст. викладач кафедри теплоенергетики Вінницького національного технічного університету.

**Ищенко Ксенія Олександрівна** – студентка Вінницького національного технічного університету.

**Спивак Александр Юрьевич** – к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики Винницкого национального технического университета.

**Боднар Лилия Анатольевна** – к.т.н., ст. преподаватель кафедры теплоэнергетики Винницкого национального технического университета.

**Ищенко Ксения Александровна** – студентка Винницкого национального технического университета.

**Spyvak Alexander** – Ph.D., docent the department heat energetics Vinnytsia National Technical University.

**Bodnar Lilia** – Ph.D., p. Lecturer of the department heat energetics Vinnytsia National Technical University.

**Ishchenko Xenia** – student Vinnytsia National Technical University.