

## Загальнотехнічні проблеми

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛОВТРАТ У КАМЕРІ ПРИ АЗОТУВАННІ

Колісник Р. В.<sup>1</sup>, Драч І. В.<sup>2</sup>, Бабак О. П.<sup>3</sup>, Вичавка А. А.<sup>4</sup>

*Хмельницький національний університет, Україна*

*E-mail: <sup>1</sup>[n.shevchuk@gmail.com](mailto:n.shevchuk@gmail.com), <sup>2</sup>[drachil@khmnu.edu.ua](mailto:drachil@khmnu.edu.ua),*

*<sup>3</sup>[babako@khmnu.edu.ua](mailto:babako@khmnu.edu.ua), <sup>4</sup>[vychavkaan@khmnu.edu.ua](mailto:vychavkaan@khmnu.edu.ua)*

Застосування різноманітних типів зносостійких та антифрикційних покриттів дає можливість збільшити термін служби та надійність роботи деталей машин та інструментів [1, 2]. Дифузійні шари, отримані за допомогою азотування, є цікавими із погляду технологічності процесу. Цей метод хіміко-термічної обробки (ХТО) може проводитись у різних агрегатних станах робочого середовища, а вироби після азотування не потребують додаткової термічної обробки. Процес азотування дозволяє отримати покриття із високими фізико-механічними властивостями [3].

Метод газового азотування відрізняється простотою виконання, легкістю регулювання будови та складу дифузійного шару, можливістю автоматизації процесу [4]. Газове азотування із застосуванням індукційного нагрівання проводять у герметичній неметалевій камері, яка міститься в індукторі. Збільшення продуктивності процесу азотування полягає в утворенні та оновленні активних атомів азоту локально біля оброблюваної поверхні. Активація азоту прискорюється під впливом височастотного електромагнітного поля [5].

Використання моделювання методом скінченних елементів процесу ХТО зразків з інструментальної сталі має на меті встановлення температурної області ефективної дифузії азоту в зразок. Моделювання розподілу фізичних полів дозволяє також встановити: оптимальну силу струму індуктора, за допомогою якого будуть дотримуватись певні теплові режими; візуальне уявлення локального прогріву зразка при обробці його робочої зони [6].

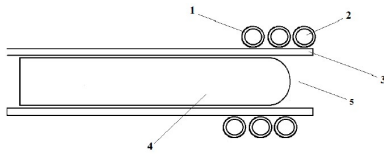
У статті визначено основні етапи моделювання та надано аналіз результатів комп'ютерного моделювання процесу хіміко-термічної обробки зразків з інструментальної сталі.

I етап моделювання – визначення основних характеристик системи індуктор – камера – зразок. Швидкість та рівномірність нагріву до необхідної температури залежить від великої кількості змінних факторів. Основні фактори можна згрупувати як електричні; електро- та теплофізичні; просторово-часові [7].

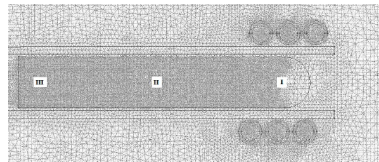
II етап – постановка задачі при моделюванні процесів, що відбуваються під час нагрівання струмами високої частоти (ТВЧ). Основним завданням моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) є визначення: температурного поля в зоні знаходження азотомісного середовища (в експерименті технічно неможливо визначити таку температуру); кінетики нагріву та змін температурних полів на поверхні камери для подальшого зіставлення результатів моделювання з експериментальними даними.

Вхідними даними для моделювання є:

- геометричні розміри циліндричного зразка, що нагрівається;
- температура ХТО (планується проводити процес азотування інструментальної сталі за температури до 900 – 1100 °С) [8];
- програмне забезпечення та методика для розрахунку температурних та електромагнітних полів [7].



**Рис. 1. Геометрична модель камери для ХТО, яка міститься в індукторі:**  
**1 – індуктор; 2 – вода; 3 – кварцова трубка; 4 – зразок із швидкорізальної сталі; 5 – азотомісне середовище**



**Рис. 2. Модель камери для ХТО із створеною сіткою СЕ:**  
**I – робоча зона зразка;**  
**II – середина хвостовика зразка;**  
**III – хвостовик зразка**

III етап: побудова спрощеної геометричної моделі системи індуктор – камера – зразок (рис.1), визначення граничних умов, характеристик матеріалів. Модель індуктора має три витки; зовнішній діаметр мідної трубки 64 мм при товщині стінки 0,7 мм. Охолоджувальна рідина – дистильована вода. Кварцова камера трубчастого типу є муфелем та електроізоляційним матеріалом між

індуктором та зразком. Її внутрішній діаметр перевищує діаметр зразка та становить 20 мм при товщині стінки 1,5 мм, довжина 180 мм. Металевий зразок розташований у центрі системи.

Розбиття геометричної моделі сіткою скінченних елементів (рис. 2) дає можливість автоматично розрахувати вихідні параметри: температуру, тепловиділення, густину струму [9].

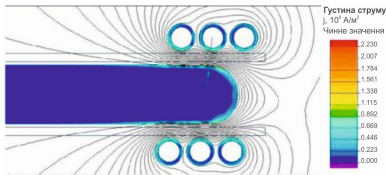
Для математичної моделі початковими даними є електро- та теплофізичні властивості матеріалів системи індуктор – камера – зразок (мідь (1), вода (2), кварц (3), інструментальна сталь марки Р6М5 (4), азот (5)) [8]. Граничні умови задачі електродинаміки: нульова величина дотичної напруги на зовнішній поверхні металевого зразка та внутрішній поверхні трубчастого індуктора; на межі розрахунку потенціалу вектор магнітного поля та фазовий зсув дорівнюють нулю.

Для задачі теплопровідності (нестационарної теплопередачі) даними є: коефіцієнт теплопровідності; питома теплоємність; густина матеріалу. У моделі врахована залежність коефіцієнта теплопровідності та питомої теплоємності від температури [8] для мітки «Інструментальна сталь». Вхідними параметрами, підібраними експериментальним шляхом, є: сила струму на індукторі 3,1 кА, а частота струму 108000 Гц. Тривалість комп'ютерного моделювання становить 400 с; крок розрахункових точок 10 с. Визначивши момент початку виходу температури на стаціонарний режим, можна стверджувати, що знайдена величина сили струму буде достатньою для нагрівання виробу до заданої температури.

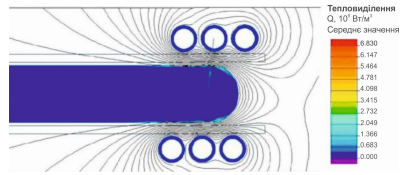
IV етап: розв'язання задач електродинаміки та теплопровідності для системи індуктор – камера – зразок при обробці ТВЧ – визначення характеру розподілу та графічний розв'язок у вигляді карт ліній густини струмів та об'ємної густини тепловиділення.

V етап – аналіз розв'язків. Для заданих параметрів моделі електродинаміки отримано: найбільша густина струму ( $0,7 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ ) досягається на зовнішній частині індуктора, яка знаходиться ближче до камери, що нагрівається; на поверхні зразка спостерігається підвищена густина струму ( $2 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ ), що пояснюється скін-ефектом при проникненні змінного магнітного поля вглиб зразка; оскільки провідність азоту, дистильованої води і кварцу в розрахунках не враховується, то в для цих компонент системи маємо нульове значення густини струму. Таким чином, можна припустити, що під дією вихрових струмів зразок, що міститься в центральній частині камери, буде сильно нагріватися (рис. 3, тонкими лініями показані ізотерми рівня магнітного потенціалу).

Метою теплового розрахунку є визначення об'ємної густини тепловиділення. Одержали: найбільша кількість тепла ( $6,3 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>) виділяється на поверхні зразка (спостерігається почастішання ліній тепловиділень, що говорить про виникнення скін-шару) та в центральній зоні камери в азотовмісному середовищі, де міститься зразок. З рис. 4 на прикінцевому моменті часу видно, що кількість тепловиділення на поверхневому шарі зразка на порядок вища, ніж усередині камери. Така нерівномірність тепловиділення пов'язана з особливістю процесу індукційного нагрівання ТВЧ (понад 100 кГц). Очевидно, високе тепловиділення в азотовмісному середовищі пов'язане з перевипромінюванням змінного поля всередину системи, що нагрівається.



**Рис. 3. Розподіл густини струму у системі індуктор – камера – зразок при силі струму 3,1 кА у прикінцевий момент часу**

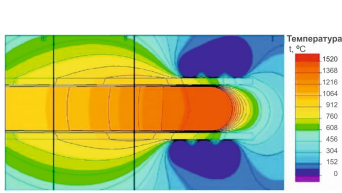


**Рис. 4. Розподіл об'ємної густини тепловиділення у системі індуктор – камера – зразок при силі струму 3,1 кА у прикінцевий момент часу**

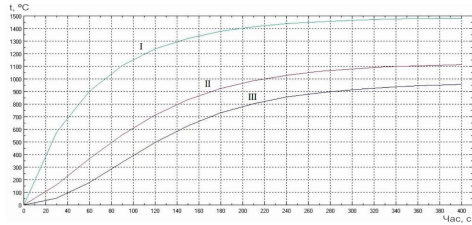
Для заданих значень сили струму та фіксованої частоти на індукторі, зазначених початкових та граничних умов з урахуванням теплових втрат на конвекцію та випромінювання розв'язками задачі теплопровідності є карти розподілу температури, зокрема, на прикінцевому моменті часу (рис. 5). Цей розв'язок показує, що температура поверхневого шару зразка перевищує температуру його плавлення. Однак, в експерименті таке явище не спостерігається. Таким чином, при нагріванні матеріалу крім відомих теплових втрат на конвекцію та випромінювання діє тепловий стік іншої природи. Ймовірно, що при нагріванні зразка відбуваються процеси утворення нових фаз (хімічних сполук – оксидів, нітридів та твердих розчинів проникнення кисню в метал) та зміна структури (зростання кристалічних зерен) [8].

Розв'язок задачі тепловиділення з урахуванням теплових втрат на процеси ХТО має вигляд параболічних кривих з ділянками насичення. Найбільший інтерес становлять графіки для периферії зразка в області максимальної напруженості поля (у центрі котушки

індуктора) (рис. 6, крива I). Крива I характеризується значно більшою швидкістю нагріву до максимальної температури.



**Рис. 5. Модель розподілу температури у системі індуктор – камера – зразок при силі струму 3,1 кА у прикінцевий момент часу**



**Рис. 6. Графіки кінетики нагріву системи індуктор – камера – зразок при силі струму 3,1 кА: I – крива залежності у робочій зоні зразка; II – крива залежності у середині хвостовика зразка; III – крива залежності на кінці хвостовика**

Таким чином, в ході моделювання МСЕ отримані розв’язки задач електродинаміки та теплопровідності для системи індуктор – камера – зразок, які описують кінетику нагріву при операції ХТО зразка зі швидкорізальної сталі. Основними впливовими чинниками в моделі є: сила струму на індукторі, зміни тепло- та електрофізичних властивостей сталі та теплових втрат, викликаних конвекцією, випромінюванням, процесом азотування сталевого зразка. Встановлено, що на поверхні зразка в ділянках його робочої зони спостерігається підвищення температури на 200 – 300 °С. При струмі 3,1 кА досягається максимальна температура (1470 °С) і найбільший градієнт швидкості нагрівання цієї ділянки зразка (400 °С). При нагріванні теплові втрати збільшуються до 1500 °С, після цієї точки спостерігається незначне зростання теплових втрат.

## Література

1. Shepelenko I. (2021). Technological factors influence on the antifriction coatings quality. *Problems of Tribology*, 26(2/100), 50–57.
2. Mortimer J., Rudnev V., Clowes D., Shaw B. (2019) *Intricacies of Induction Heating of Wires, Rods, Ropes & Cables*. Wire Forming Technology International, I/2019, pp. 46-50.
3. Toboła D., Brostow W., Czechowski K., Rusek P. (2017). Improvement of wear resistance of some cold working tool steels. *Wear*. Vol. 382-383. P. 29 – 39.

4. Behrens B.-A., Bouguecha A., Lüken I., Mielke J., Bistron M. 5.11 - Tribology in Hot Forging, Editor(s): Saleem Hashmi, Gilmar Ferreira Batalha, Chester J. Van Tyne, Bekir Yilbas, Comprehensive Materials Processing, Elsevier, 2014. P. 211-234.
5. Maldzinski L., Tacikowski J., 12 - ZeroFlow gas nitriding of steels, Editor(s): Eric J. Mittemeijer, Marcel A.J. Somers, Thermochemical Surface Engineering of Steels, Woodhead Publishing, 2015. P. 459-483.
6. Sharma G.K., Pant P., Jain P.K., Kankar P.K., Tandon P. (2022). Numerical and experimental analysis of heat transfer in inductive conduction based wire metal deposition process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 236, no. 5, pp. 2395-2407.
7. Bao L., Wang B., You X., Li H., Gu Y., Liu W. (2020). Numerical and experimental research on localized induction heating process for hot stamping steel sheets. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 151, art. no. 119422.
8. Мохорт А.В., Чумак М.Г. Термічна обробка металів. Київ: Вид-во Либідь, 2002. 512 с.
9. Xiaohu D., Dong-ying Ju, Min L. (2017). Finite Element Modeling and Experimental Verification of Nitriding Process in S30C Steel. Materials Research. 20. 10.1590/1980-5373-mr-2016-0531.

## ОБ'ЄМНІ НАНОКРИСТАЛІЧНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ МІДІ

*Гречанюк В.Г.<sup>1,2</sup>, Шаповалов В.О.<sup>2</sup>, Гречанюк І.М.<sup>1</sup>,  
Гречанюк М.І.<sup>3</sup>, Маценко О.В.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва та архітектури,*

*<sup>2</sup>Інститут електрозварювання ім С. О.Патона,*

*<sup>3</sup>Інститут проблем матеріалознавства НАН України*

*E-mail: <sup>1</sup>eltechnic777@ukr.net*

Структура конденсованих композиційних матеріалів (ККМ) істотно залежить від концентрації зміцнюючої фази, температури осадження та інших технологічних параметрів. Введення другої фази у певних концентраційних діапазонах дозволяє отримувати шаруваті (мікрошарові) матеріали на основі міді та молібдену з розміром зерна  $\cong 1$  мкм [1-3]. Подальше диспергування структури при температурах підкладки 700-900°C не можливе через неоднорідність градієнтних ККМ і розпад мікрошарів товщиною менше 1 мкм.