

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.3(84).13859

*М. С. СТЕЧИШИН, М. М. ЛУК'ЯНЮК, М. В. ЛУК'ЯНЮК**Хмельницький національний університет, Україна*

МОДЕЛЮВАННЯ ТРИБОСИСТЕМИ ПРИ БЕЗВОДНЕВОМУ АЗОТУВАННІ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ

Розроблений апарат формування моделі трибосистеми може використовуватись як для визначення її характеристик, так і для розробки параметрів технології, яка б забезпечувала виконання експлуатаційних вимог. При цьому при виконанні зазначених вище умов досягається висока точність адекватності теоретичної моделі стосовно реальної.

Ключові слова: трибосистема, безводневе азотування в тліючому розряді, фазовий склад, моделювання

Вступ і постановка задач дослідження. Кінцевим результатом азотування поверхні металів є зміна структури і фазового стану приповерхневого шару, який в більшості випадків виконує функції трибосистеми. Параметри цієї системи залежать від сформованої в результаті модифікації структури приповерхневого шару, його складу, характеристик та конкретних показників фізико-хімічних властивостей окремих фаз, що входять в нього.

Важливим фактором при цьому залишається питання прогнозування властивостей трибосистеми в результаті перетворень металевої поверхні та вибір початкових параметрів режиму азотування на основі концепції оптимізації технології.

Аналітичні критерії подібної оптимізації розроблені на основі енергетичної моделі технології [1], основоположною тезою котрої є те, що в конкретних умовах азотування в першу чергу проходять ті субпроцеси (елементарні складові загального процесу), які в даний момент енергетично найбільш вигідні [2]. Проте слід зауважити, що отримані результати в основному характеризують процес якісно, але вкрай опосередковано стосуються кількісних характеристик. Іншими словами, на основі згаданої концепції можливий аналіз за схемою кращих чи гірших результатів модифікації, але неможливо отримати точні параметри кінцевих результатів.

Для оптимізації технології в певних конкретних умовах її реалізації цього абсолютно достатньо [3, 4], але в складних системах взаємовідношень вихідних та кінцевих параметрів потрібна інша модель, котра встановлювала б та враховувала весь спектр взаємних залежностей умов модифікації та її результатів, наприклад, при терті.

Мега роботи – розробка напрямків та основ переходу від параметрів технологічного режиму до характеристик результатів модифікації. Рішення подібної задачі дозволить не тільки прогнозувати потрібні результати, але й проектувати технології азотування таким чином, щоб отримувати ті характеристики системи, які відповідають наперед заданим вимогам експлуатації.

Виклад основного матеріалу дослідження. У самому загальному вигляді на структуру моделі трибосистеми впливають не тільки технологічні параметри режиму азотування, але і особливості попереднього стану поверхні і її перетворення в результаті безводневого азотування в тліючому розряді.

На величину конкретних значень характеристик сформованої таким чином трибосистеми суттєво впливають також і методики випробувань та фіксації три-

ботехнічних показників. В цьому випадку оптимальне рішення полягає у створенні таких умов експериментів з визначення параметрів трибосистеми, які б у повній мірі співпадали з реальними умовами експлуатації.

Дійсно, значення зносостійкості, які отримані при контактному тиску, котрий суттєво перевищує тиск в реальній фрикційній системі, можуть зовсім неадекватно відображати працездатність модифікованого виробу, скажімо – за рахунок більшого впливу схоплювання поверхонь тощо.

Спрощена структурна схема формування моделі трибосистеми показана на рисунку 1.

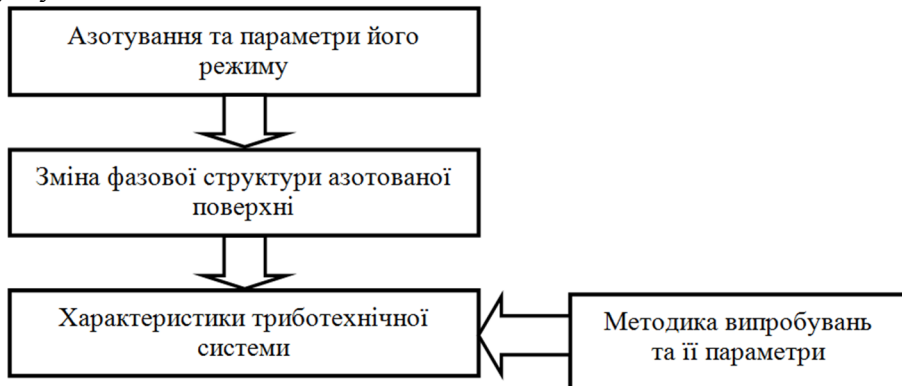


Рис. 1. Загальна структура формування моделі трибосистеми

В найпростішому вигляді модель трибосистеми є сукупністю взаємозв'язків між характеристиками окремих стадій її формування. В кінцевому варіанті саме в такій абстрактній формі ця модель являє собою багаторівневу систему залежностей між параметрами модифікаційного процесу (факторами впливу) P та результуючими характеристиками трибосистеми R :

$$R_y = r_k(P_1, P_2 \dots P_u), \quad (1)$$

y – індекс результуючої характеристики процесу; r – функція зв'язку першого переходу при формуванні багатofакторної моделі; k – залежність певного типу між коефіцієнтами в рівняннях попереднього переходу та фактором з індексом, рівним номеру поточного переходу; u – число параметрів модифікаційного процесу, які впливають на результуючі характеристики трибосистеми, відповідно – число переходів формування моделі.

Очевидно, що аналітичний опис на всіх рівнях послідовних переходів найбільш раціонально створюється за методикою формування багатofакторних моделей, викладеною в [2]. Суть її полягає в послідовному виключенні факторів впливу i , таким чином, утворенні системи залежностей, за допомогою яких розраховуються результат залежно від всіх факторів впливу.

Розглянемо означену методику на прикладі загального вигляду, при цьому введемо позначення:

R – результуюче значення моделі; $P_1, P_2, \dots P_u$ – вхідні параметри моделі (фактори впливу); K – коефіцієнти рівнянь певного переходу (з відповідними переходу індексами, система формування яких викладена нижче); Z_1, Z_2, \dots, Z_U – число коефіцієнтів в рівняннях певного переходу (обов'язковою вимогою методики формування багатofакторних моделей є те, що в будь-якому конкретному переході для всіх залежностей використовуються рівняння тільки одного типу,

тобто число коефіцієнтів в одному переході завжди однакове); Nu – номер послідовного переходу.

Послідовність залежностей у створеній моделі в дійсності обернена відносно послідовності операцій виключення факторів впливу. Це пов'язано з тим, що кінцевий результат визначається в останню чергу, першими ж в алгоритмі розрахунку є ті залежності, які стосуються фактора впливу, котрий виключається останнім [2]. Таким чином, на першому переході фактично встановлюється залежність між кінцевим результатом та тим фактором, який виключається першим. При виборі послідовності виключення факторів впливу керуються простим правилом: оскільки складність, а вірніше – громіздкість, системи залежить від числа коефіцієнтів в рівняннях певного переходу, то бажано щоб найбільш складні серед них були в структурі моделі останніми, а в алгоритмі обчислення першими. Тому на початку формування моделі проводиться зондує дослідження характеру впливу всіх вхідних параметрів на кінцевий результат і той з них, який впливає лінійно або взагалі не змінює результату, приймається в якості першого фактору виключення. Слід зауважити, що не варто зловживати спрощенням характеру впливу, оскільки це неминуче призведе до зниження точності моделі. Це правило стосується також заокруглення коефіцієнтів, бо в деяких випадках необхідно використовувати їх значення до декількох знаків після коми, що при сучасних методах обчислення не викликає ніякої процедурної складності.

Отже, на першому переході ($Nu=1$) встановлюється залежність між конкретною результуючою характеристикою трибосистеми та першим в послідовності виключення фактором впливу (параметром модифікаційного процесу):

$$R(P_1, P_2, \dots, P_u) = r(P_1, K_1(P_2), K_2(P_2), \dots, K_{Z_1}(P_2)). \quad (2)$$

Згідно з концепцією формування моделі в наступному переході ($Nu=2$) виявляється залежність коефіцієнтів в рівнянні (1) від наступного фактора впливу P_2 . При цьому число рівнянь буде дорівнювати кількості коефіцієнтів в рівнянні (1):

$$\begin{cases} K_1(P_2) = k_1(P_2, K_{11}(P_3), K_{12}(P_3), \dots, K_{1(Z_2)}(P_3)), \\ K_2(P_2) = k_2(P_2, K_{21}(P_3), K_{22}(P_3), \dots, K_{2(Z_2)}(P_3)), \\ K_{Z_1}(P_2) = k_{Z_1}(P_2, K_{(Z_1)1}(P_3), K_{(Z_1)2}(P_3), \dots, K_{(Z_1)(Z_2)}(P_3)). \end{cases}, \quad (3)$$

Далі (перехід, номер якого $Nu=3$) коефіцієнти в рівняннях другого переходу, позначення котрих від K_{11} до $K_{(Z_1)(Z_2)}$, зв'язуються залежностями з наступним в послідовності виключення параметром P_3 :

$$\begin{cases} K_{11}(P_3) = k_{11}(P_3, K_{111}(P_4), K_{112}(P_4), \dots, K_{11(Z_3)}(P_4)), \\ K_{12}(P_3) = k_{12}(P_3, K_{121}(P_4), K_{122}(P_4), \dots, K_{12(Z_3)}(P_4)), \\ K_{1(Z_2)}(P_3) = k_{1(Z_2)}(P_3, K_{1(Z_2)1}(P_4), K_{1(Z_2)2}(P_4), \dots, K_{1(Z_2)(Z_3)}(P_4)), \\ K_{21}(P_3) = k_{21}(P_3, K_{211}(P_4), K_{212}(P_4), \dots, K_{21(Z_3)}(P_4)), \\ K_{2(Z_2)}(P_3) = k_{2(Z_2)}(P_3, K_{2(Z_2)1}(P_4), K_{2(Z_2)2}(P_4), \dots, K_{2(Z_2)(Z_3)}(P_4)), \\ K_{(Z_1)1}(P_3) = k_{(Z_1)1}(P_3, K_{(Z_1)11}(P_4), K_{(Z_1)12}(P_4), \dots, K_{(Z_1)1(Z_3)}(P_4)), \\ K_{(Z_1)(Z_2)}(P_3) = k_{(Z_1)(Z_2)}(P_3, K_{(Z_1)(Z_2)1}(P_4), K_{(Z_1)(Z_2)2}(P_4), \dots, K_{(Z_1)(Z_2)(Z_3)}(P_4)). \end{cases} \quad (4)$$

Структура рівнянь четвертого переходу ($Nu=4$) аналогічна попереднім, тому обмежимося тільки першим та останнім:

$$\begin{cases} K_{111}(P_4) = k_{111}(P_4, K_{1111}(P_5), K_{1112}(P_5), \dots, K_{111(Z4)}(P_5)), \\ K_{(Z1)(Z2)(Z3)}(P_4) = \\ = k_{(Z1)(Z2)(Z3)}(P_4, K_{(Z1)(Z2)(Z3)1}(P_5), K_{(Z1)(Z2)(Z3)2}(P_5), \dots, K_{(Z1)(Z2)(Z3)(Z4)}(P_5)). \end{cases} \quad (5)$$

З наведених викладок відслідковується система формування рівнянь моделі будь-якої складності, котра, як зазначалось вище визначається числом факторів впливу та кількістю коефіцієнтів в рівняннях певного переходу. Кількість рівнянь в кожному переході (за винятком першого, де завжди одне рівняння) дорівнює числу коефіцієнтів в попередньому, або, враховуючи, що в останньому переході коефіцієнти є сталими величинами, оскільки вже всі фактору впливу виключені, визначається як добуток кількості коефіцієнтів в рівняннях всіх переходів за винятком останнього. Загальне число рівнянь в моделі є сумою кількості рівнянь на всіх переходах:

$$Z_p = 1 + Z1 \cdot Z2 \cdot \dots \cdot Z(u-1). \quad (6)$$

Для виведення принципу загальної структури рівнянь введемо поняття індексу i , який змінюється від $1 \dots u$ (кількість одиниць на одиницю менше номера переходу Nu) до $(Z1)(Z2) \dots (Z(Nu))$. Тоді загальна структура рівнянь матиме вигляд:

$$K_{(i)}(P_{Nu}) = k_{(i)}(P_{Nu}, K_{(i)1}(P_{Nu+1}), K_{(i)2}(P_{Nu+1}), \dots, K_{(i)(Zu)}(P_{Nu+1})). \quad (7)$$

Проведена перевірка цієї моделі у якій 4 фактори впливу в обчислювальній системі типу Math CAD із застосуванням процедур поліномів або функції *genfit*.

Висновки. Розроблений апарат формування моделі трибосистеми може використовуватись як для визначення її характеристик, так і для розробки параметрів технології, яка б забезпечувала б виконання експлуатаційних вимог. При цьому при виконанні зазначених вище умов досягається висока точність адекватності теоретичної моделі стосовно реальної, що підтверджено на прикладі моделі розподілу мікротвердості по глибині азотованого шару сталі 45.

Список літератури

1. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. – Х. : Нац. научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2006. – 364 с.
2. Пастух І. М. Фізико-технічна обробка поверхні металів безводневим азотуванням в тліючому розряді: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.07 / І. М. Пастух. – Хмельницький, 2008. – 520 с.
3. Каплун В. Г. Научные основы технологии упрочнения деталей машин и инструмента ионным азотированием в безводородных средах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.01 / В. Г. Каплун. – Хмельницький, 1992. – 450 с.
4. Стечишин М.С. Вплив іонного азотування сталей в тліючому розряді на структуру і властивості покривів / М. С. Стечишин, А. В. Мартинюк, Ю. М. Білик, В. П. Олександренко, Н. М. Стечишина // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2017. – Т. 53, № 3. – С. 49–55.

M. S. STECHYSHYN, M.M. LUKIANIUK, M.V. LUKIANIUK

SIMULATION OF THE TRIBOSYSTEM IN AN ANHYDROUS IN GLOW DISCHARGE

The developed apparatus for forming the tribosystem model can be used both for determining its characteristics and for developing parameters of technology that would ensure the fulfillment of operational requirements. However, when the above conditions are met, the accuracy of the theoretical model's adequacy with respect to the real one is achieved.

Key words: tribosystem, anhydrous nitriding in glow discharge, phase composition, modeling.

References

1. Pastukh I. M. Teoriya i praktika bezvodnorodnogo azotirovaniya v tleyushchem razryade / I. M. Pastukh. – Kh. : Nats. nauchnyy tsentr «Kharkovskiy fiziko-tekhnicheskyy institut». 2006. – 364 s.
2. Pastukh I. M. Fyzyko-tekhnichna obrobka poverkhni metaliv bezvodnevym azotuvanniam v tliiuchomu rozriadi: dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.03.07 / I. M. Pastukh. – Khmelnytskyi, 2008. – 520 s.
3. Kaplun V. G. Nauchnyye osnovy tekhnologii uprochneniya detaley mashin i instrumenta ionnym azotirovaniyem v bezvodnorodnykh sredakh : dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.02.01 / V. G. Kaplun. – Khmelnytskyi. 1992. – 450 s.
4. Stechyshyn M.S. Vplyv ionnoho azotuvannia stalei v tliiuchomu rozriadi na strukturu i vlastyvoli pokryviv / M. S. Stechyshyn, A. V. Martyniuk, Yu. M. Bilyk, V. P. Oleksandrenko, N. M. Stechyshyna // Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv. – 2017. – T. 53, № 3. – S. 49–55.