

**МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ МІКРОТВЕРДОСТІ В ГЛИБИНУ  
МОДИФІКОВАНОГО ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ**

*Розроблена методика створення аналітичної моделі зміни мікротвердості в поверхневому шарі, утвореному азотуванням в тліючому розряді, залежно від параметрів технологічного режиму.*

*Ключові слова: мікротвердість, поверхневий шар, розподіл, модель, азотування, тліючий розряд.*

I.M. PASTUKH, G.M. SOKOLOVA, O.S. ZDYBEL'  
Khmelnitsky National University

**MODELLING DISTRIBUTION MICROHARDNESS IN DEPTH MODIFIED SURFACE LAYER**

*Abstract - The technique of creating a model microhardness changes in the surface layer created by nitriding in a glow discharge, depending on the parameters of the technological regime*

*Keywords: microhardness, surface layer, the distribution model, nitriding, glow discharge.*

**Вступ**

В більшості варіантів обробка експериментальних даних розподілу мікротвердості поверхневого модифікованого шару, сформованого азотуванням в тліючому розряді, проводиться з використанням апарату планування експериментів. В цьому випадку кількість факторів впливу, як правило, не більше двох, що суттєво спрощує дійсну структуру процесу аж до її повної невідповідності реальним умовам обробки. В дійсності число факторів впливу набагато більше і навіть неповне врахування або взагалі ігнорування кожного з них призводить до суттєвого відхилення даних теоретичної моделі від реальних результатів, причому не тільки до повної невідповідності значень, але й навіть – тенденцій зміни. Очевидно, що подібні методики неприйнятні тим більше, якщо модель процесу – багатофакторна, тобто така, якою вона є в реальності. Справді, далеко в неповній моделі характеристики зміни твердості в глибину модифікованого поверхневого шару залежать від складу газового середовища, його тиску, температури поверхні під час азотування, тривалості власне процесу, хімічного складу матеріалу об'єкта обробки. Кожний з цих факторів в більшій чи меншій мірі впливає на кінцеві результати. В першу чергу вони проявляються в структурі поверхневого модифікованого шару, головним фізико-механічним показником якого є мікротвердість окремих його зон. Наявність аналітичного представлення цієї характеристики відкриває шлях для побудови загальної моделі експлуатаційних показників модифікованих виробів, наприклад – параметрів зносостійкості. Слід при цьому зауважити, що для вирішення подібних задач найбільш прийнятним є саме аналітичне представлення параметрів, оскільки власне аналітичні моделі найбільш зручні в порівнянні, наприклад, з табличною, графічною, у вигляді баз даних формою відображення параметрів, прийнятною для автоматизованої обробки. В свою чергу ця перевага дозволяє легко вбудовувати результати досліджень в системи автоматизованого управління технологічними процесами.

Процедура побудови багатофакторних моделей як з теоретичних позицій, так і конкретної методики в повній мірі викладена в попередніх роботах [1, 2], проте, як показує практика застосування моделей процесів з декількома факторами впливу на кінцевий результат, в кожному конкретному випадку виявляються все нові і нові особливості, невраховування яких може призвести до формування моделей, практично непридатних для скільки-небудь реального застосування. В цій роботі розглянуто задачу моделювання розподілу мікротвердості по глибині модифікованого поверхневого шару, сформованого на сталі 20 азотуванням в тліючому розряді зі змінними параметрами технологічного процесу.

**Експериментальні дослідження**

Експериментальні дослідження проводились на установці УАТР-1, яка призначена для азотування в тліючому розряді у безводневих газових середовищах. Межі змін технологічних характеристик режиму вибирались з огляду на накопичений досвід обробки матеріалів певного класу, тобто на відміну від інших методик, котрі часто використовуються в дослідницькій практиці аналогічного типу, подальша обробка, а також, що можливо ще й важливіше, використання отриманих результатів досліджень передбачає тільки застосування апарату інтерполяції. Це в принципі відрізняє прийняту методику досліджень від тих способів одержання та використання отриманих в експериментах даних, коли застосовується також апарат екстраполяції, в багатьох випадках – без будь-якої гарантії, що прийнята при цьому тенденція зміни характеристики відповідає дійсності.

Всього проведено 27 технологічних процесів, при цьому параметри режиму та значення мікротвердості на поверхні відповідали таблиці 1.

Після азотування контрольні зразки, циліндричної форми (діаметр 5 мм, довжина 20 мм) розрізались в діаметральній площині при параметрах різання, які не призводили до скільки-небудь суттєвого їх нагрівання, що забезпечувало незмінність структури модифікованого поверхневого шару. Мікротвердість вимірювалась на мікротвердомірі ПМТ-3 з фіксацією як значень мікротвердості  $HV_{0,1}$  на поверхні, так і на певній відстані від поверхні.

Технологічні режими азотування

Номер режиму	Температура, °С	Тиск, тор	Склад газового середовища	Мікротвердість на поверхні, $H_M$
1	520	0,6	N80Ar20	324,2
2	520	0,6	N50Ar50	478,0
3	520	0,6	N20Ar80	328,8
4	520	0,9	N80Ar20	435,8
5	520	0,9	N50Ar50	445,8
6	520	0,9	N20Ar80	279,4
7	520	1,2	N80Ar20	372,8
8	520	1,2	N50Ar50	417,0
9	520	1,2	N20Ar80	278,2
10	560	0,6	N80Ar20	459,0
11	560	0,6	N50Ar50	439,8
12	560	0,6	N20Ar80	386,8
13	560	0,9	N80Ar20	444,8
14	560	0,9	N50Ar50	511,0
15	560	0,9	N20Ar80	339,6
16	560	1,2	N80Ar20	441,4
17	560	1,2	N50Ar50	510,8
18	560	1,2	N20Ar80	426,4
19	600	0,6	N80Ar20	666,0
20	600	0,6	N50Ar50	530,4
21	600	0,6	N20Ar80	484,0
22	600	0,9	N80Ar20	638,2
23	600	0,9	N50Ar50	601,6
24	600	0,9	N20Ar80	481,2
25	600	1,2	N80Ar20	599,4
26	600	1,2	N50Ar50	551,6
27	600	1,2	N20Ar80	599,2

В загальному варіанті в структуру поверхневого модифікованого шару, утвореного азотуванням в тліючому розряді, входять (в більшій чи меншій питомій частці аж до повної відсутності деяких з них)  $\epsilon$ -,  $\gamma$ -фази, то зона  $\alpha$  – твердого розчину азоту в залізі [3]. Відповідно в міру зміщення в глибину модифікованого поверхневого шару змінюються як величина показника мікротвердості, так і градієнт її зміни. Для графічного представлення закону зміни мікротвердості в принциповому плані можуть використовуватись або лінійчата інтерпретація по окремих зонах, або монотонна функція певного виду. Перший варіант більш точно відображає параметр мікротвердості, оскільки в реаліях на межах між однією зоною фазової структури та іншою практично завжди спостерігається більший чи менший ступінчастий перехід мікротвердості. Проте на практиці аналітичне представлення, хоча воно і базується на простій функції лінійного виду, використовувати складно оскільки необхідно вводити розміри зон фазової структури. В свою чергу така вимога потребує точного визначення розмірів фаз, що багатократно нівелює переваги методу. З цієї причини модель створювалась з використанням монотонних функцій, для яких характерна визначеність похідної в усіх точках (іншими словами – відсутні переломи на графіках).

В принципі вказані вимози відповідають безліч функцій як алгебраїчних, так і тригонометричних, показникових, гіперболічних тощо, а також інших більш складніших типів. З умови найбільшої простоти представлення, що в наступному забезпечує найменшу складність процедури формування моделі, вибрані алгебраїчні функції видів (1) і (2)

$$H(x) = H_0 + \frac{(H_M - H_0)}{(1 + (0,001 x)^a)^b} \tag{1}$$

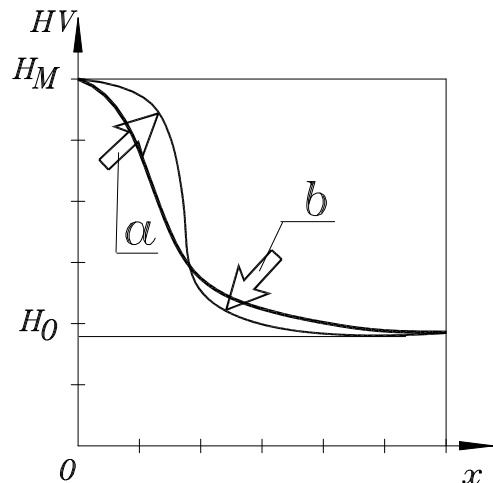


Рис. 1. Характер впливу на зміну форми кривої збільшення коефіцієнтів  $a$  і  $b$

$$H(x) = H_0 + \frac{(H_M - H_0)}{1 + (0,001 x)^a} \quad (2)$$

Функція (1) більш складна порівняно з функцією (2) в процедурі формування моделі, оскільки в ній два керуючих коефіцієнти  $a$  і  $b$ , проте в неї значно більші можливості підгонки кривої до масиву експериментальних даних. Характер впливу на форму кривої збільшення коефіцієнтів  $a$  і  $b$  показано на рис. 1. Очевидно, що використовуючи функції будь-якого з двох видів (1) або (2), аргумент повинен бути тільки додатний. За допомогою коефіцієнта  $a$  формується площадка, котра відповідає ділянці з розвинутою  $\varepsilon$ -фазою. Навпаки, збільшення коефіцієнта  $b$  застосовується в тому випадку, коли ширина зон  $\gamma$ -фази та твердого розчину незначні і твердість по глибині азотованого шару різко зменшується. Очевидно, що вибір комбінації коефіцієнтів  $a$  і  $b$  повинен проводитись за критерієм мінімальної суми квадратів відхилень розрахункових значень функції (1) від експериментальних даних.

Загальний алгоритм обробки результатів досліджень показано на рисунку 2.



Рис. 2. Загальний алгоритм формування моделі розподілу мікротвердості по глибині модифікованого шару

Модель розподілу твердості по глибині шару для сталі 20 має наступний вигляд, причому слід звернути увагу на необхідність дуже високої точності фіксації коефіцієнтів в рівняннях, без чого неможливо забезпечити і необхідну точність моделі (реально похибка між розрахунковими та експериментальними значеннями мікротвердості по всьому ареалу можливого використання вхідних параметрів не перевищує 4%). В моделі та частково на рис. 1 використані наступні позначення:  $t$  – температура процесу (поверхні),  $A$  – вміст азоту в газовому середовищі в об'ємних долях,  $p$  – тиск в розрядній камері в торах,  $H(x)$  – функція розподілу мікротвердості по глибині  $x$  модифікованого шару,  $H_M$  – мікротвердість на поверхні,  $H_0$  – мікротвердість основи (всі показники мікротвердості – в одиницях шкали Віккерса):

$$\begin{aligned}
 K2011(t) &:= -11818.2827529819 + 51.6421035647 \cdot t - 0.0548851835 \cdot t^2 \\
 K2012(t) &:= -336.9500447187 + 0.9477773987 \cdot t - 0.0005839025 \cdot t^2 \\
 K2013(t) &:= 4.2334363737 - 0.0137047888 \cdot t + 0.0000107619 \cdot t^2 \\
 K2021(t) &:= 56967.0999964477 - 221.0767329915 \cdot t + 0.2152045530 \cdot t^2 \\
 K2022(t) &:= -369.3662622578 + 1.7748873373 \cdot t - 0.0020676342 \cdot t^2 \\
 K2023(t) &:= 1.2041492405 - 0.0061676581 \cdot t + 0.0000076204 \cdot t^2 \\
 K2031(t) &:= -43415.0118613114 + 165.0741234255 \cdot t - 0.1574602886 \cdot t^2 \\
 K2032(t) &:= 703.0539805038 - 2.7596854852 \cdot t + 0.0027267036 \cdot t^2 \\
 K2033(t) &:= -5.4078645476 + 0.0202431309 \cdot t - 0.0000191318 \cdot t^2 \\
 K2041(t) &:= 171570.8148825267 - 586.9837681557 \cdot t + 0.5081174699 \cdot t^2 \\
 K2042(t) &:= -11693.1994605738 + 40.2488759018 \cdot t - 0.0348447203 \cdot t^2 \\
 K2043(t) &:= 106.3272252898 - 0.3666883658 \cdot t + 0.0003181550 \cdot t^2 \\
 K2051(t) &:= -294076.4537422942 + 999.3907986552 \cdot t - 0.8616683938 \cdot t^2 \\
 K2052(t) &:= 21425.3561710676 - 73.5504468811 \cdot t + 0.0636741616 \cdot t^2 \\
 K2053(t) &:= -187.6346064240 + 0.6443233090 \cdot t - 0.0005582301 \cdot t^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K2061(t) &:= 137649.9753854241 - 471.6836187646 \cdot t + 0.4114214458 \cdot t^2 \\
K2062(t) &:= -10446.0971051425 + 36.0569785768 \cdot t - 0.0314233043 \cdot t^2 \\
K2063(t) &:= 90.3505158945 - 0.3118248614 \cdot t + 0.002718395 \cdot t^2 \\
K2071(t) &:= -4575.0568295211 + 15.8527993245 \cdot t - 0.0137208971 \cdot t^2 \\
K2072(t) &:= 149.6052767890 - 0.5183518978 \cdot t + 0.0004486768 \cdot t^2 \\
K2073(t) &:= -1.1553890167 + 0.0040019263 \cdot t - 0.0000034631 \cdot t^2 \\
K2081(t) &:= 11605.4341490279 - 40.1954032595 \cdot t + 0.0347766472 \cdot t^2 \\
K2082(t) &:= -382.8439823332 + 1.3258702732 \cdot t - 0.0011471347 \cdot t^2 \\
K2083(t) &:= 2.9898152585 - 0.0103502379 \cdot t + 0.0000089519 \cdot t^2 \\
K2091(t) &:= -6491.9285840875 + 22.4849217813 \cdot t - 0.0194540235 \cdot t^2 \\
K2092(t) &:= 215.8439581820 - 0.7476335501 \cdot t + 0.0006469565 \cdot t^2 \\
K2093(t) &:= -1.6970992056 + 0.0058761728 \cdot t - 0.0000050832 \cdot t^2 \\
K2101(t) &:= -8985.1072836648 + 31.8315888188 \cdot t - 0.0281719825 \cdot t^2 \\
K2102(t) &:= 336.3657951307 - 1.1930174790 \cdot t + 0.0010566735 \cdot t^2 \\
K2103(t) &:= -3.0942921753 + 0.01097557284 \cdot t - 0.0000097133 \cdot t^2 \\
K2111(t) &:= 23083.1686857423 - 81.6861520487 \cdot t + 0.0722386843 \cdot t^2 \\
K2112(t) &:= -854.7435247706 + 3.0285778441 \cdot t - 0.0026802087 \cdot t^2 \\
K2113(t) &:= 7.8415234247 - 0.0277847574 \cdot t + 0.0000245680 \cdot t^2 \\
K2121(t) &:= -12895.2838475545 + 45.6329675832 \cdot t - 0.0403531011 \cdot t^2 \\
K2122(t) &:= 482.4781564683 - 1.7089281041 \cdot t + 0.0015117452 \cdot t^2 \\
K2123(t) &:= -4.4666442031 + 0.0158162787 \cdot t - 0.0000139754 \cdot t^2 \\
K1011(A,t) &:= K2011(t) + K2012(t) \cdot A + K2013(t) \cdot A^2 \\
K1012(A,t) &:= K2021(t) + K2022(t) \cdot A + K2023(t) \cdot A^2 \\
K1013(A,t) &:= K2031(t) + K2032(t) \cdot A + K2033(t) \cdot A^2 \\
K1021(A,t) &:= K2041(t) + K2042(t) \cdot A + K2043(t) \cdot A^2 \\
K1022(A,t) &:= K2051(t) + K2052(t) \cdot A + K2053(t) \cdot A^2 \\
K1023(A,t) &:= K2061(t) + K2062(t) \cdot A + K2063(t) \cdot A^2 \\
K1031(A,t) &:= K2071(t) + K2072(t) \cdot A + K2073(t) \cdot A^2 \\
K1032(A,t) &:= K2081(t) + K2082(t) \cdot A + K2083(t) \cdot A^2 \\
K1033(A,t) &:= K2091(t) + K2092(t) \cdot A + K2093(t) \cdot A^2 \\
K1041(A,t) &:= K2101(t) + K2102(t) \cdot A + K2103(t) \cdot A^2 \\
K1042(A,t) &:= K2111(t) + K2112(t) \cdot A + K2113(t) \cdot A^2 \\
K1043(A,t) &:= K2121(t) + K2122(t) \cdot A + K2123(t) \cdot A^2 \\
H_0(p,A,t) &:= K1011(A,t) + K1012(A,t) \cdot p + K1013(A,t) \cdot p^2 \\
H_M(p,A,t) &:= K1021(A,t) + K1022(A,t) \cdot p + K1023(A,t) \cdot p^2 \\
a(p,A,t) &:= K1031(A,t) + K1032(A,t) \cdot p + K1033(A,t) \cdot p^2 \\
b(p,A,t) &:= K1041(A,t) + K1042(A,t) \cdot p + K1043(A,t) \cdot p^2
\end{aligned}$$

$$H(x) = H_0(p, A, t) + \frac{(H_M(p, A, t) - H_0(p, A, t))}{[1 + (0.001 \cdot x)^{a(p, A, t)}]^{b(p, A, t)}}$$

### Висновок

Створена на основі розробленої методики модель розподілу мікротвердості по глибині азотованої в тліючому розряді сталі 20 з високою точністю відповідає реальним показникам і може бути використаною для автоматизованого проектування технологічного режиму модифікації.

### Література

1. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. – Х. : Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2006. – 364 с.
2. Методика формування моделі трибосистем при азотуванні в тліючому розряді / И. М. Пастух, М. В. Лук'янюк, В. О. Курская, Г. М. Соколова // Вісник ХНУ, Технічні науки. – 2013. – № 5. – С. 12–16.
3. Лахтин Ю. М. Азотирование стали / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М. : Машиностроение, 1976. – 256 с.

### References

1. Pastukh I. M. Theorija i praktyka bezvodородного азотирования в тлеющем разряде – Kharkov, National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology". 2006 – 364 p.
2. Pastukh I. M., Luk'januk M. V., Kurskaja V. O., Sokolova G. M. Metodyka formuvanja modeli trybosystem pry азотуванні в тліючому розряді // Visnyk Khnu, № 5, 2013. S. 12-16
3. Lakhtin J. M., Kogan J. D. Azotirovanie stali – M.: Mashinostrojenie, 1976. – 256 s.

Рецензія/Peer review : 15.1.2014 р.

Надрукована/Printed : 7.2.2014 р.

Статтю представляє: д.т.н. Пастух І.М.