

УДК 621.78/(66.088+537.52+66.046)

І.М. ПАСТУХ, Г.М. СОКОЛОВА, О.С. ЗДИБЕЛЬ

Хмельницький національний університет

**МІКРОТВЕРДІСТЬ МОДИФІКОВАНОГО ШАРУ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ,
АЗОТОВАНИХ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ**

Наведені загальна форма моделі для розрахунку розподілу мікротвердості по глибині азотованого шару конструкційних сталей, а також значення коефіцієнтів моделі, які можуть бути використаними для побудови графіків зміни мікротвердості.

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

I.M. PASTUKH, G.M. SOKOLOVA, O.S. ZDYBEL

Khmelnitsky National University

MICROHARDNESS OF THE MODIFIED LAYER STRUCTURAL STEEL NITRIDED IN A GLOW DISCHARGE

Abstract - A general structure of the model of the changes in surface hardness after nitriding in a glow discharge. Model coefficients are given for some structural steels. Set out the analytical method of calculating surface microhardness after nitriding in a glow discharge. Shows the values of the coefficients of the model that can be used for plotting changes in microhardness. These results have practical application in the process of surface modification of metals.

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

Вступ

Процес керованої модифікації поверхні металів може бути реалізованим при умові наявності моделі параметрів, які характеризують результати обробки. Тільки в цьому випадку відкриваються можливості управління технологією в напрямку отримання певної структури та складу модифікованого шару, які, в першу чергу, визначаються умовами та вимогами подальшої експлуатації об'єктів обробки. При цьому важливо також зазначити, що тільки при наявності аналітичної моделі може бути розроблена система автоматизованого управління роботою устаткування для модифікації, яка б забезпечувала реалізацію зазначеного вище принципу. Аналітична модель впливу параметрів технологічного режиму на кінцеві результати створюється шляхом обробки експериментальних даних, отриманих в результаті проведення серії дослідів. В [1, 2] розроблені методика обробки масиву експериментальних даних, які залежать від декількох факторів впливу (так звана багатофакторна модель), та продемонстрована практична її реалізація на моделі розподілу мікротвердості в глибину модифікованого шару для однієї з конструкційних сталей, викладено алгоритм програмного забезпечення, з допомогою якого реалізується згадана методика. Показано, що саме застосована методика дозволяє з високою точністю (відхилення теоретичних значень моделі розподілу мікротвердості від експериментальних по всьому ареалу отриманих результатів не перевищує декількох процентів (реально – не більше 4%). Звичайно, досягнення подібної точності можливе тільки при певній складності структури моделі та високій точності констант, котрі її формують. Проте при сучасному стані можливостей автоматизованого обчислення результатів на основі згаданої моделі практичне її використання скільки-небудь складної процедури не представляє. Слід також зауважити, що наведена в [1] модель може бути трансформованою в модель загального виду, про що докладніше буде зазначено нижче. Дійсно, оскільки досліджується результат одного типу (розподіл мікротвердості в глибину модифікованого шару), то і структура моделі повинна бути уніфікованою для багатьох сталей. В цьому випадку аналітичне представлення моделі для всіх сталей однотипне, а змінні константи можуть бути зведеними в таблиці, що суттєво спрощує практичне застосування моделі як в аспекті подальших досліджень, так і практичного використання в системах управління модифікаційними технологіями. В цьому випадку можливе встановлення загальної моделі взаємозв'язку згаданих констант з множиною технологічних параметрів обробки деталей.

Експериментальні дослідження та їх результати

Для всіх конструкційних сталей, вибраних в якості об'єктів дослідження, проведені азотування взірців згідно з технологічними режимами, характеристики яких приведені в [1]. Там же викладена методика проведення експериментів. Загальна структура моделі розподілу мікротвердості в глибину поверхнього модифікованого шару має вигляд

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

$$H_0(p, A, t) := K11(A, t) + K12(A, t) \cdot p + K13(A, t) \cdot p^2$$

$$H_M(p, A, t) := K21(A, t) + K22(A, t) \cdot p + K23(A, t) \cdot p^2$$

$$a(p, A, t) := K31(A, t) + K32(A, t) \cdot p + K33(A, t) \cdot p^2$$

$$\begin{aligned}
 b(p, A, t) &:= K41(A, t) + K42(A, t) \cdot p + K43(A, t) \cdot p^2 \\
 K11(A, t) &:= K111(t) + K112(t) \cdot A + K113(t) \cdot A^2 \\
 K12(A, t) &:= K121(t) + K122(t) \cdot A + K123(t) \cdot A^2 \\
 K13(A, t) &:= K131(t) + K132(t) \cdot A + K133(t) \cdot A^2 \\
 K21(A, t) &:= K211(t) + K212(t) \cdot A + K213(t) \cdot A^2 \\
 K22(A, t) &:= K221(t) + K222(t) \cdot A + K223(t) \cdot A^2 \\
 K23(A, t) &:= K231(t) + K232(t) \cdot A + K233(t) \cdot A^2 \\
 K31(A, t) &:= K311(t) + K312(t) \cdot A + K313(t) \cdot A^2 \\
 K32(A, t) &:= K321(t) + K322(t) \cdot A + K323(t) \cdot A^2 \\
 K33(A, t) &:= K331(t) + K332(t) \cdot A + K333(t) \cdot A^2 \\
 K41(A, t) &:= K411(t) + K412(t) \cdot A + K413(t) \cdot A^2 \\
 K42(A, t) &:= K421(t) + K422(t) \cdot A + K423(t) \cdot A^2 \\
 K43(A, t) &:= K431(t) + K432(t) \cdot A + K433(t) \cdot A^2 \\
 K111(t) &:= K1111 + K1112 \cdot t + K1113 \cdot t^2 \\
 K112(t) &:= K1121 + K1122 \cdot t + K1123 \cdot t^2 \\
 K113(t) &:= K1131 + K1132 \cdot t + K1133 \cdot t^2 \\
 K121(t) &:= K1211 + K1212 \cdot t + K1213 \cdot t^2 \\
 K122(t) &:= K1221 + K1222 \cdot t + K1223 \cdot t^2 \\
 K123(t) &:= K1231 + K1232 \cdot t + K1233 \cdot t^2 \\
 K131(t) &:= K1311 + K1312 \cdot t + K1313 \cdot t^2 \\
 K132(t) &:= K1321 + K1322 \cdot t + K1323 \cdot t^2 \\
 K133(t) &:= K1331 + K1332 \cdot t + K1333 \cdot t^2 \\
 K211(t) &:= K2111 + K2112 \cdot t + K2113 \cdot t^2 \\
 K212(t) &:= K2121 + K2122 \cdot t + K2123 \cdot t^2 \\
 K213(t) &:= K2131 + K2132 \cdot t + K2133 \cdot t^2 \\
 K221(t) &:= K2211 + K2212 \cdot t + K2213 \cdot t^2 \\
 K222(t) &:= K2221 + K2222 \cdot t + K2223 \cdot t^2 \\
 K223(t) &:= K2231 + K2232 \cdot t + K2233 \cdot t^2 \\
 K231(t) &:= K2311 + K2312 \cdot t + K2313 \cdot t^2 \\
 K232(t) &:= K2321 + K2322 \cdot t + K2323 \cdot t^2 \\
 K233(t) &:= K2331 + K2332 \cdot t + K2333 \cdot t^2 \\
 K311(t) &:= K3111 + K3112 \cdot t + K3113 \cdot t^2 \\
 K312(t) &:= K3121 + K3122 \cdot t + K3123 \cdot t^2 \\
 K313(t) &:= K3131 + K3132 \cdot t + K3133 \cdot t^2 \\
 K321(t) &:= K3211 + K3212 \cdot t + K3213 \cdot t^2 \\
 K322(t) &:= K3221 + K3222 \cdot t + K3223 \cdot t^2 \\
 K323(t) &:= K3231 + K3232 \cdot t + K3233 \cdot t^2 \\
 K331(t) &:= K3311 + K3312 \cdot t + K3313 \cdot t^2 \\
 K332(t) &:= K3321 + K3322 \cdot t + K3323 \cdot t^2 \\
 K333(t) &:= K3331 + K3332 \cdot t + K3333 \cdot t^2 \\
 K411(t) &:= K4111 + K4112 \cdot t + K4113 \cdot t^2 \\
 K412(t) &:= K4121 + K4122 \cdot t + K4123 \cdot t^2 \\
 K413(t) &:= K4131 + K4132 \cdot t + K4133 \cdot t^2 \\
 K421(t) &:= K4211 + K4212 \cdot t + K4213 \cdot t^2 \\
 K422(t) &:= K4221 + K4222 \cdot t + K4223 \cdot t^2 \\
 K423(t) &:= K4231 + K4232 \cdot t + K4233 \cdot t^2 \\
 K431(t) &:= K4311 + K4312 \cdot t + K4313 \cdot t^2 \\
 K432(t) &:= K4321 + K4322 \cdot t + K4323 \cdot t^2 \\
 K433(t) &:= K4331 + K4332 \cdot t + K4333 \cdot t^2
 \end{aligned}$$

В моделі 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 при навантаженні 0,98 Н):

Значення коефіцієнтів моделі для сталі 38Х2МЮА наведені в таблиці 1, для сталі 20 – в таблиці 2, для сталі 45 – в таблиці 3, для сталі 40Х – в таблиці 4.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів моделі розподілу мікротвердості для сталі 38Х2МЮА

Коефіцієнт	Значення	Коефіцієнт	Значення	Коефіцієнт	Значення
1	2	3	4	5	6
K1111	-40832.8531852635	K2211	-1156131.8794660487	K3311	-1217.8986265827
K1112	141.6300256354	K2212	4141.6292648755	K3312	4.3618555033
K1113	-0.1214745116	K2213	-3.7082435026	K3313	-0.0039021061

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6
K1121	2361.0942999994	K2221	56647.8265023373	K3321	75.2991144687
K1122	-8.1365410744	K2222	-202.9250998747	K3322	-0.2695787510
K1123	0.0069688716	K2223	0.1816200446	K3323	0.0002409291
K1131	-19.9722194791	K2231	-494.1238745755	K3331	-0.6978264338
K1132	0.0681404798	K2232	1.7689418874	K3332	0.0024995253
K1133	-0.0000577166	K2233	-0.0015824513	K3333	-0.0000022346
K1211	93194.9288040097	K2311	652924.7757948199	K4111	-32497.9229056547
K1212	-320.6101311372	K2312	-2341.6920533585	K4112	116.4471437717
K1213	0.2743103870	K2313	2.0982692725	K4113	-0.1040745962
K1221	-5713.0940183963	K2321	-31937.7813566066	K4121	1196.1427125694
K1222	19.6663536171	K2322	144.5133734289	K4122	-4.2745359381
K1223	-0.0168227203	K2323	-0.1025536997	K4123	0.0038166270
K1231	48.3591428289	K2331	279.0247306120	K4131	-7.9176136694
K1232	-0.1646634744	K2332	-0.9999841104	K4132	0.0283623306
K1233	0.0001391707	K2333	0.0008952639	K4133	-0.0000254072
K1311	-51423.1673566951	K3111	-932.6288439090	K4211	62450.8523787174
K1312	176.7092873878	K3112	3.3471403484	K4212	-223.4565318186
K1313	-0.1509812598	K3113	-0.0029990459	K4213	0.1996610607
K1321	3321.5131158449	K3121	59.3214662265	K4221	-2321.5448619446
K1322	-11.4418980103	K3122	-0.2127494649	K4222	8.2958489829
K1323	0.0097961913	K3123	0.0001905921	K4223	-0.0074123850
K1331	-28.4488980811	K3131	-0.5479358767	K4231	15.0551796712
K1332	0.0970304360	K3132	0.0019665117	K4232	-0.0539771663
K1333	-0.0000821837	K3133	-0.0000017626	K4233	0.0000484562
K2111	465612.2558975870	K3211	2176.7830042617	K4311	-30011.4941663741
K2112	-1659.8088610397	K3212	-7.8066476816	K4312	107.4197211835
K2113	1.4831305955	K3213	0.0069970937	K4313	-0.0960151219
K2121	-22692.0926159900	K3221	-139.0185823807	K4321	1103.6196086150
K2122	81.1666294867	K3222	0.4984347960	K4322	-3.9436072309
K2123	-0.0725695062	K3223	-0.0004462631	K4323	0.0035242902
K2131	195.2524470714	K3231	1.2950824860	K4331	-6.9755128687
K2132	-0.6978840766	K3232	-0.0046460721	K4332	0.0250455582
K2133	0.0006236345	K3233	0.0000041614	K4333	-0.0000225257

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів моделі розподілу мікротвердості для сталі 20

Коефіцієнт	Значення	Коефіцієнт	Значення	Коефіцієнт	Значення
1	2	3	4	5	6
K1111	14476.1577875856	K2211	503322.1809700044	K3311	2882.6852429735
K1112	-39.1363221111	K2212	-1753.5330592801	K3312	-9.8798164312
K1113	0.0233720800	K2213	1.5115418286	K3313	0.0084466128
K1121	-1191.5193622857	K2221	-25245.7728619189	K3321	-88.8309912010
K1122	3.89807622331	K2222	87.5760700185	K3322	0.3042204418
K1123	-0.0031272635	K2223	-0.0752280082	K3323	-0.0002598142
K1131	10.8070465077	K2231	271.1609698080	K3331	0.6465542499
K1132	-0.0363993952	K2232	-0.9396137995	K3332	-0.0022150118
K1133	0.0000303262	K2233	0.0008072329	K3333	0.0000018919
K1211	-10761.0044262443	K2311	-253889.1901135645	K4111	-2113.4567789703
K1212	12.746846583	K2312	880.0587383152	K4112	8.1080335049
K1213	0.0136328136	K2313	-0.7538736896	K4113	-0.0077206417
K1221	1831.7971314757	K2321	12162.5797758785	K4121	113.0371537207
K1222	-5.8243672363	K2322	-41.9967868458	K4122	-0.4220019313
K1223	0.0044834474	K2323	0.0358644245	K4123	0.0003920049
K1231	-15.7278768670	K2331	-131.0799504990	K4131	-1.3763795523
K1232	0.0522881463	K2332	0.4526374631	K4132	0.0050448396
K1233	-0.0000427725	K2333	-0.0003871798	K4133	-0.0000046004
K1311	-3574.9504361824	K3111	1612.1882963379	K4211	5383.4628403053
K1312	27.5310542197	K3112	-5.5079278957	K4212	-20.5800247252
K1313	-0.0388886772	K3113	0.0046935229	K4213	0.0195609883

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6
K1321	-591.7480158162	K3121	-51.4801898105	K4221	-279.5030847866
K1322	1.7104642640	K3122	0.1758717369	K4222	1.0426287061
K1323	-0.0011268738	K3123	-0.0001497919	K4223	-0.0009681836
K1331	4.5521508079	K3131	0.3914222633	K4231	3.4165969607
K1332	-0.0141426364	K3132	-0.0013382555	K4232	-0.0125082255
K1333	0.0000105111	K3133	0.0000011405	K4233	0.0000113985
K2111	-225216.1903790329	K3211	-4331.4093569506	K4311	-2483.6921737810
K2112	782.8761309616	K3212	14.8246517016	K4312	9.6881868047
K2113	-0.6727962362	K3213	-0.0126544347	K4313	-0.0093662211
K2121	11876.7245329092	K3221	135.1034316053	K4321	144.1014270783
K2122	-41.1234807424	K3222	-0.4622815130	K4322	-0.5407227288
K2123	0.0353038630	K3223	0.0003943755	K4323	0.0005046716
K2131	-126.2988550577	K3231	-0.9943956190	K4331	-1.8637462831
K2132	0.4364254830	K3232	0.0034047759	K4332	0.0068300835
K2133	-0.0003741846	K3233	-0.0000029059	K4333	-0.0000062286

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів моделі розподілу мікротвердості для сталі 40

Коефіцієнт	Значення	Коефіцієнт	Значення	Коефіцієнт	Значення
K1111	-8512.5213848044	K2211	738813.7520687056	K3311	1914.6045407249
K1112	38.8531736627	K2212	-2691.9716479732	K3312	-6.8431532663
K1113	-0.04110658269	K2213	2.4537073490	K3313	0.0060933834
K1121	401.6789796994	K2221	-19753.5998670282	K3321	-63.6097192649
K1122	-1.5205471742	K2222	71.2008218415	K3322	0.2281614173
K1123	0.0014285414	K2223	-0.0645200701	K3323	-0.0002038286
K1131	-8.6412102630	K2231	199.5511690984	K3331	0.5222016615
K1132	0.0307680392	K2232	-0.7128041457	K3332	-0.0018773339
K1133	-0.0000273627	K2233	0.0006409331	K3333	0.0000016807
K1211	-1467.1531349414	K2311	-357841.1220203949	K4111	-168.3987662024
K1212	-10.5716400244	K2312	1303.7352363858	K4112	0.5023142408
K1213	0.0225163328	K2313	-1.1898511450	K4113	-0.0004092234
K1221	-484.2040564630	K2321	8021.1383068463	K4121	40.6834545772
K1222	1.8620793050	K2322	-28.8368995878	K4122	-0.1306490035
K1223	-0.0017631458	K2323	0.0261974897	K4123	0.0001068448
K1231	21.023391900	K2331	-74.5536443339	K4131	-0.8991202276
K1232	-0.0742659967	K2332	0.2651640446	K4132	0.0030515976
K1233	0.0000654301	K2333	-0.0002390421	K4133	-0.0000026131
K1311	291.0770631138	K3111	1435.6456848757	K4211	-749.6725540955
K1312	7.5411269173	K3112	-5.1317347457	K4212	3.0082056916
K1313	-0.0136063568	K3113	0.0045707719	K4213	-0.0028438602
K1321	310.9152624049	K3121	-48.7562687308	K4221	-72.3907473700
K1322	-1.1760585194	K3122	0.1750485462	K4222	0.2210559037
K1323	0.0010892235	K3123	-0.0001565149	K4223	-0.0001710836
K1331	-13.5961338910	K3131	0.4186470405	K4231	2.0583739452
K1332	0.0480456630	K3132	-0.0015058913	K4232	-0.0069531933
K1333	-0.0000422694	K3133	0.0000013489	K4233	0.0000059182
K2111	-343491.8042024375	K3211	-3500.8296980714	K4311	966.4243018686
K2112	1250.8688390359	K3212	12.5174353938	K4312	-3.6817647304
K2113	-1.1370307113	K3213	-0.0111491941	K4313	0.0034144170
K2121	10697.7406909851	K3221	117.6565798119	K4321	26.8376273771
K2122	-38.5878892221	K3222	-0.4222410385	K4322	-0.0727927489
K2123	0.0348983745	K3223	0.0003773629	K4323	0.0000483782
K2131	-114.5990818541	K3231	-0.9873541186	K4331	-1.0854863993
K2132	0.4101701760	K3232	0.0035504908	K4332	0.0036366983
K2133	-0.0003682475	K3233	-0.0000031792	K4333	-0.0000030682

Значення коефіцієнтів моделі розподілу мікротвердості для сталі 40X

Коефіцієнт	Значення	Коефіцієнт	Значення	Коефіцієнт	Значення
K1111	66152.4111869288	K2211	-488968.8174423154	K3311	116.3264623866
K1112	-238.7873016588	K2212	1832.2189497729	K3312	-0.4064624884
K1113	0.2153987990	K2213	-1.7086526904	K3313	0.0003517352
K1121	-3142.8912783356	K2221	27710.7598268445	K3321	-4.4057137216
K1122	11.5008664327	K2222	-102.3500093411	K3322	0.0159962723
K1123	-0.0104782818	K2223	0.0942085336	K3323	-0.0000144377
K1131	29.3428118262	K2231	-274.0536238729	K3331	0.0321885814
K1132	-0.1079463823	K2232	1.0106481272	K3332	-0.0001202025
K1133	0.0000988824	K2233	-0.0009288626	K3333	0.0000001117
K1211	-239912.3105464026	K2311	213348.6695196483	K4111	-786.7621461168
K1212	872.7401744903	K2312	-806.1348887087	K4112	2.7299038383
K1213	-0.7908438219	K2313	0.7577116140	K4113	-0.0023433385
K1221	12311.2602508346	K2321	-13150.2922015544	K4121	26.3340429064
K1222	-45.1000745876	K2322	48.6784324966	K4122	-0.0820401410
K1223	0.0411601668	K2323	-0.0449084390	K4123	0.0000620129
K1231	-117.3677994766	K2331	134.1728936775	K4131	-0.3179203231
K1232	0.4313856493	K2332	-0.4950144188	K4132	0.0009954623
K1233	-0.0003950371	K2333	0.0004552278	K4133	-0.0000007556
K1311	143386.2267215240	K3111	-74.4616414581	K4211	-29.0384460294
K1312	-521.3377943415	K3112	0.2781189255	K4212	0.4272966581
K1313	0.4721592814	K3113	-0.0002566128	K4213	-0.0006415161
K1321	-7392.4989056794	K3121	4.1397259488	K4221	44.9068514828
K1322	27.0515784844	K3122	-0.0146237906	K4222	-0.1898069420
K1323	-0.0246601062	K3123	0.0000128281	K4223	0.0001947564
K1331	70.5106448644	K3131	-0.0437737436	K4231	-0.3309643158
K1332	-0.2587862463	K3132	0.0001526629	K4232	0.0015238053
K1333	0.0002366202	K3133	-0.0000001319	K4233	-0.0000016625
K2111	263834.3241457567	K3211	-65.0209528943	K4311	624.7347025540
K2112	-979.3678622718	K3212	0.2107521816	K4312	-2.4175679653
K2113	0.9074455980	K3213	-0.0001658155	K4313	0.0022980392
K2121	-13870.6295276714	K3221	1.1350847117	K4321	-63.0763585919
K2122	51.1639599122	K3222	-0.0043600747	K4322	0.2418201722
K2123	-0.0470061327	K3223	0.0000041447	K4323	-0.0002294533
K2131	132.9936692031	K3231	0.0025377412	K4331	-0.5750707584
K2132	-0.4905380201	K3232	-0.0000010269	K4332	-0.0022454863
K2133	0.0004506755	K3233	-0.0000000068	K4333	0.0000021669

Висновок

Наведені аналітична модель та значення констант, які входять в модель, для основних сталей, котрі переважно азотуються в тліючому розряді, можуть використовуватись з метою побудови графіків зміни мікротвердості в глибину азотованого шару, а також для аналізу впливу параметрів технологічного режиму на цей розподіл. Крім того, викладений матеріал може використовуватись для формування системи управління процесом з метою досягнення оптимальних результатів модифікації.

Література

1. Пастух І.М. Моделювання розподілу мікротвердості в глибину модифікованого поверхневого шару / І.М. Пастух, Г.М. Соколова, О.С. Здибель // Вісник ХНУ, Технічні науки. – 2014. – № 1. – С. 21–25.
2. Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / Пастух И.М. – Х. : Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2006. – 364 с.

References

1. Pastukh I. M., Sokolova G. M., Zlybel O. S. Modeluvannya rozpodilu mikrotverdosti v glybynu poverhneвого шару // Visnyk Khnu, № 1, 2014. S. 21-25
2. Pastukh I. M. Theoriya i praktyka bezvodородного азотирования v tleushchem razrjade – Kharkov, National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology". 2006 – 364 p.

Рецензія/Peer review : 13.3.2014 р. Надрукована/Printed : 7.4.2014 р.

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