

DOI 10.31891/2307-5732-2019-273-3-6-12

УДК 669.1:537.5

М.С. СТЕЧИШИН, М.В. ЛУК'ЯНИЮК, В.П. ОЛЕКСАНДРЕНКО, М.М. ЛУК'ЯНИЮК

Хмельницький національний університет

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ГАЗОРОЗРЯДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПОДІЛЬСЬКОМУ НАУКОВОМУ ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ЦЕНТРІ

У роботі досліджено фізико-хімічні та трибологічні характеристики поверхневих азотованих шарів конструкційних сталей після БАТР з автономними енергетичними параметрами (напруга, густина струму, питома потужність електричного розряду). Крім розширення технологічних рамок, застосування БАТР з автономними (незалежними) параметрами дозволяє значно знизити енерговитрати на азотування. Показано також конструктивні зміни в установці для реалізації автономних енергетичних режимів. Встановлено вплив густини струму, напруги на протікання субпроцесів: утворення нітридів, розпорошення поверхні і дифузії азоту. Значення потужності електричного розряду визначає межі існування тліючого розряду, його перехід від тліючого до дугового.

Ключові слова: безводневе азотування в тліючому розряді (БАТР), фізико-хімічні та трибологічні властивості азотованих шарів, автономні (незалежні) енергетичні параметри.

M.S. STECHYSHYN, M.V. LUKIANIUK, V.P. OLEKSANDRENKO, M.M. LUKIANIUK

Khmelnytskyi National University

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF LOW-TEMPERATURE GAS-RISK TECHNOLOGIES IN THE PODILSKYI SCIENTIFIC PHYSICAL-TECHNOLOGICAL CENTRE

The article deals with the emergence and development of scientific activity on the basis of the newly created Khmelnytsky Institute of Consumer Services, the first in Khmelnytsky higher education institution in the city. The creation of the scientific centre under the direction of the assistant professor, now the doctor of technical sciences, professor V.G. Kaplun, has been analysed, on the basis of which Podilsky scientific physics and technology centre (PSPTC) grew. To date, PSPTC has become an all-Ukrainian centre for the creation and development of the latest technologies for the modification of metal surfaces using nitration in the glow discharge, including autonomous power parameters. The physicochemical and tribological characteristics of surface nitrided layers of structural steels after BATR with autonomous energy parameters (voltage, current density, specific power of electric discharge) are investigated in this work. In addition to expanding the technological framework of using BATR with autonomous (independent) parameters, it can significantly reduce energy consumption by nitriding. Also shown are structural changes in the installation for the implementation of autonomous power regimes. The influence of current density, stress on the flow of subprocesses: formation of nitrides, surface dispersion and nitrogen diffusion have been established. The value of the power of the electric discharge determines the limits of the existence of a glow discharge, its transition from the glare to the arc.

Key words: anhydrous nitration in glow discharge (BATR), physico-chemical and tribological properties of nitrided layers, autonomous (independent) energy parameters.

ВСТУП

Відразу після створення Хмельницького технологічного інституту побутового обслуговування (ХТПО) під керівництвом нині д. т. н., проф. Каплуна В. Г. розпочалася наукова робота першого в м. Хмельницький вищого навчального закладу. На основі укладеної угоди з Хмельницьким заводом термопластавтоматів досліджувалася зносостійкість шнеків термопластавтоматів. Для підвищення їх зносостійкості разом з науковцями Московського автомобільно-дорожнього інституту (проф. Лахтін Ю.М.) було вибрано, як показав час, перспективний і універсальний науковий напрямок зміцнення металічних поверхонь деталей безводним азотуванням в тліючому розряді (БАТР). У науковій лабораторії ХТПО вперше в Україні була сконструйована і виготовлена установка для азотування в азото-аргонній суміші У-1. Заміна аміаку на азото-аргонну суміш забезпечила екологічність процесу, значне, порівняно з пічним азотуванням, зниження енергоємності, виключення водневого окрихчення, поліпшення техніки безпеки і умов роботи обслуговуючого персоналу.

Усі наукові і практичні дослідження процесів БАТР проводилися на установках для азотування в тліючому розряді, сконструйованих і виготовлених науковцями і співробітниками нині Подільського наукового фізико-технологічного центру (ПНФТЦ) Хмельницького національного університету (ХНУ).

У процесі проведення досліджень БАТР в конструкцію установок було внесено ряд важливих змін: розроблено за участі доц. Лук'янюка М. В. автоматичну систему газопідготовки, яка включає кисневий очисник, що виключає попадання в камеру кисню і вологи, водневий уловлювач також були розроблені за участі доц. Давидова А. М. мікропроцесори для управління процесами БАТР (блок стабілізації розряду (БСР); стабілізатор процесу азотування (СПА); контролер процесу азотування (КПА); блок контролю і управління газорозрядного деформаційного вакуумметра ВДГ-1; блок імпульсного живлення розряду (БКР)) [1].

На сьогоднішній день розроблено і виготовлено експериментальні зразки семи установок потужністю від 5 до 160 кВт, з числом камер від 1 до 3, для яких створено банк оптимальних технологічних

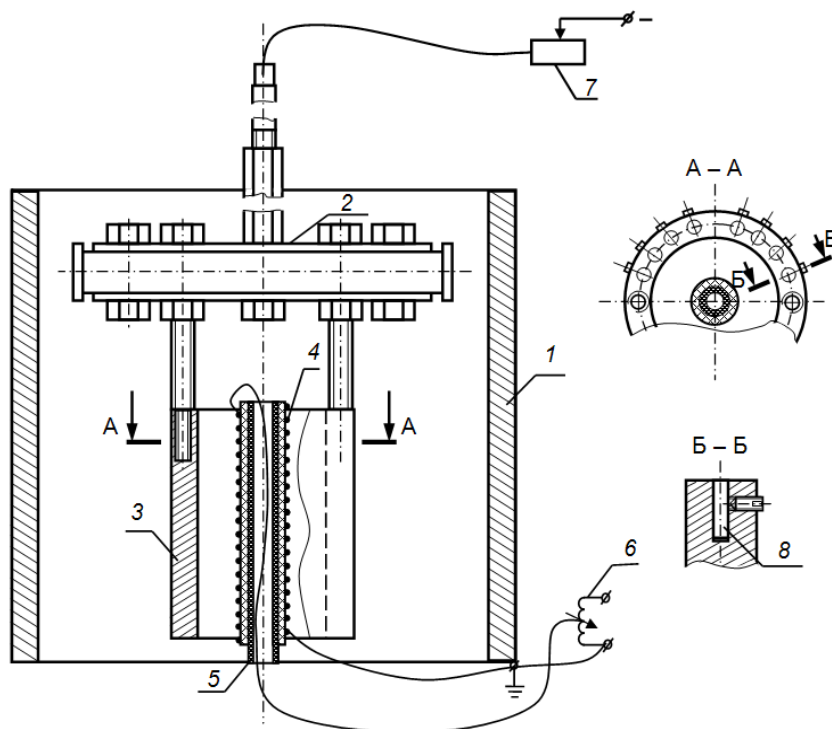
режимів БАТР, залежно від виду матеріалу деталі, вимог її експлуатації, форми і розмірів [1, 2].

Подальші дослідження проводились на основі енергетичної теорії БАТР, розробленої проф. Пастухом І. М. з автономними (незалежними) енергетичними режимами [2].

Безводне азотування в тліючому розряді з незалежними параметрами відкриває принципово нові можливості як теоретичного, так і технологічного планів. Перш за все, це стосується покращення керованості модифікаційним процесом, його оптимізації у відповідності до вимог подальшої експлуатації модифікованих деталей. Не зважаючи на очевидні нові можливості, які відкриває застосування даного процесу, він практично не досліджувався ні в теоретичному, ні в експериментальному планах, що не сприяє повному використанню всіх його потенційних можливостей. Теоретичні дослідження виконані на основі розробленої енергетичної моделі процесу, котра у значній мірі більш адекватно пояснює всі субпроцеси, які є складовими загального модифікаційного процесу. Комбінування енергетичних параметрів БАТР як у часі, так і за співвідношенням відкриває нові можливості керованого формування фазової структури поверхневого модифікованого шару відповідно до вимог експлуатації.

З точки зору екології процес абсолютно чистий і порівняно з іншими варіантами, включаючи традиційне азотування в тліючому розряді з взаємозалежними параметрами – енергетично більш вигідний, оскільки відкриває можливість оптимізації технології, в тому числі з метою скорочення енергетичних затрат, що, в свою чергу, позитивно впливає на економіку виробництва.

Методика проведення досліджень. Для реалізації процесу БАТР і забезпечення незалежності енергетичних параметрів режиму була модернізована установка азотування в тліючому розряді У-1. В принципі апаратна реалізація вказаної задачі може досягатись по-різному. Як варіант було запропоновано конструктивне рішення, яке представлено на рис. 1.



1 – корпус розрядної камери; 2 – підвіска; 3 – корпус оснастки; 4 – спіральний нагрівач; 5 – керамічна трубка; 6 – автотрансформатор; 7 – реостат баластний; 8 – зразки

Рис. 1. Ескіз оснастки для реалізації процесу азотування в тліючому розряді з автономними (незалежними) параметрами режиму

Корпус розрядної камери 1 слугує анодом, всередині якого розміщена підвіска 2, яка являється катодом, до неї під'єднаний корпус оснастки 3, у якому встановлюються зразки 8 з різних сталей. З внутрішньої сторони корпус оснастки нагрівається спіральним нагрівачем 4 на керамічному каркасі з виводом одного з кінців ніхромової спіралі через центральну керамічну трубку 5. Температура нагріву деталей (зразків) регулюється за допомогою автотрансформатора 6. Баластний реостат 7 застосовується для зміни співвідношень між струмом і напругою.

Контроль температури здійснювався за допомогою пірометра моделі АПРС-М. Вимірвальна система пірометра тарована в умовах, аналогічних реальному тліючому розряду.

Вимірювання товщини нітридної зони здійснювалися за допомогою модернізованого металографічного мікроскопа МІМ-10, що дозволило здійснювати візуальне спостереження та фотографування мікроструктури зразків, а також кількісний аналіз фазового та структурного складу сталей за допомогою напівавтоматичного вбудованого пристрою. Товщина нітридної зони модифікованого шару

розраховувалась як середнє арифметичне значення вимірювань, проведених у 50 точках досліджуваного зразка. Загальна товщина азотованого шару визначалась відповідно до ГОСТ 20495–75.

Мікротвердість вимірювалась на приладі ПМТ-3 при навантаженні 0,98 Н (0,1 кг) з фіксацією значень мікротвердості як на поверхні, так і на певній відстані від неї вглиб зразка, а саме: 0, 25, 50, 100, 200, 300, 500 мкм.

Рентгено-фазовий аналіз проводився на дифрактометрі рентгенівському загального призначення ДРОН-3 у фільтрованому випромінюванні залізного анода, в діапазоні кутів 2θ від 20° до 100° з кроком сканування $0,1^\circ$ і часом експозиції 10 с. Рентгенозйомка виконувалась від плоских торців циліндричних зразків, підданих азотуванню в глибину модифікованого шару.

З метою оптимізації кількості експериментів до мінімально необхідної з точки зору досягнення поставленої мети дослідження доцільно було провести дев'ять технологічних процесів. Оскільки вплив на експлуатаційні характеристики азотованих сталей складу газової суміші, температури та тривалості процесу азотування в тліючому розряді (АТР) уже неодноразово досліджувався [1], ці параметри прийняті постійними і призначені, виходячи з типових технологічних режимів БАТР, наведених у [2], що були складені на основі багаторічного досвіду, отриманого при проведенні експериментальних і виробничих робіт, а саме: температура $T = 560^\circ\text{C}$, тривалість процесу $\tau = 4$ год, склад газової суміші – 80% N_2 +20% Ar . Напруга та сила струму обирались дослідним шляхом при проведенні попередніх експериментів. Густина струму визначалась як відношення сили струму до загальної площі поверхні катоду. Значення тиску, напруги та густини струму наведені у таблиці 1. При цьому досліди 1, 4, 7 були проведені з залежними параметрами, тобто без застосування додаткового джерела підігріву деталей (зразків).

Таблиця 1

Технологічні параметри режимів азотування у тліючому розряді

Режим	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тиск p , Торр (Па)	0,4 (53,2)			0,8 (106,4)			1,2 (159,6)		
Напруга U , В	1100	820	515	840	515	300	700	515	300
Густина струму j , $\text{A}/\text{м}^2$	11	7,2	3,2	13,2	7,2	2,8	15,8	12,8	7,2

Досліди другої серії експериментів були проведені за тих самих режимних параметрів, що й досліди 1, 4, 7 першої серії, але із застосуванням підвіски іншої форми та розмірів, що спричинило зміну значень напруги та густини струму: $U_{11} = 680$ В; $j_{11} = 15,3$ $\text{A}/\text{м}^2$; $U_{12} = 610$ В; $j_{12} = 16,4$ $\text{A}/\text{м}^2$; $U_{13} = 540$ В; $j_{13} = 17,2$ $\text{A}/\text{м}^2$.

Експериментальні дослідження зразків на зносостійкість проводились на універсальній машині для випробування матеріалів на тертя моделі 2168УМТ за відпрацьованою в попередніх дослідженнях методикою при наступних параметрах процесу:

- тиск в зоні тертя – 16 МПа;
- швидкість взаємного переміщення зразка відносно контртіла – $v = 0,1$ м/с;
- в якості контртіла використовувалось кільце упорного підшипника виготовлене із сталі ШХ15;
- кількість одночасно досліджуваних зразків – 3, рівномірно розміщених по периметру кільця контртіла через 120 градусів, що сприяло рівномірному їх зношуванню.

Заміри величини зношення зразків здійснювалися за спеціальною схемою:

- від 0 до 50 метрів – через 5 м;
- від 50 до 100 метрів – через 10 м;
- від 100 до 250 – через 25 м;
- 250 і далі – через 50 м.

Такий підхід забезпечує більш детальне дослідження процесу зношування азотованих зразків, особливо на початковому етапі, коли стирається нітридний шар, а також перші шари зони внутрішнього азотування.

Результати досліджень та їх обговорення. Одним із очікуваних результатів досліджень було встановлення характеру розподілу мікротвердості по глибині модифікованого азотуванням в тліючому розряді шару конструкційних сталей.

Результати дослідження розподілу мікротвердості по глибині модифікованого шару на зразках із різних сталей наведено у таблиці 2.

Аналіз експериментальних даних свідчить, що зменшення значень напруги і густини струму призводить до зниження поверхневої мікротвердості сталей. Що ж стосується розподілу мікротвердості по глибині модифікованого шару, то при незначних відмінностях у градієнті її зміни абсолютні значення мікротвердості зразків, азотованих при вищих енергетичних показниках є вищими по всій глибині шару (табл. 2).

Збільшення вмісту легуючих елементів (у тому числі азотоактивних – насамперед, хрому) призводить до того, що характер вказаної залежності стає більш яскраво вираженим, що можна пояснити зростанням продуктивності процесу утворення нітридів, які, як відомо, здійснюють гальмівний вплив на дифузію азоту вглиб матеріалу і тим самим перешкоджають утворенню азотованих шарів.

Таблиця 2

Розподіл мікротвердості по глибині модифікованого шару сталей, азотованих в тліючому розряді

Номер режиму	Відстань від поверхні, мкм							
	0	25	50	100	200	300	500	1000
Сталь 45								
1	563	343	321	316	298	299	275	220
2	509	333	315	310	294	277	249	209
3	269	295	286	281	279	261	234	212
4	523	335	328	312	306	291	269	206
5	442	306	306	300	304	292	263	212
6	383	296	306	283	285	268	237	204
7	594	364	354	324	297	273	261	221
8	506	321	310	298	262	261	221	220
9	239	211	204	210	202	198	201	203
Сталь 40X								
1	796	533	481	450	366	313	273	274
2	676	524	480	421	310	263	251	252
3	412	427	365	289	253	266	256	257
4	647	469	448	439	344	306	269	258
5	444	367	383	360	295	264	255	250
6	230	227	257	254	255	256	253	250
7	842	492	464	446	360	296	249	243
8	625	447	447	407	345	284	249	254
9	238	255	233	236	243	239	240	240
Сталь 38X2МЮА								
1	1058	958	852	561	298	255	249	249
2	1041	911	822	756	347	239	241	225
3	282	320	295	281	228	235	237	240
4	1019	698	657	618	443	256	230	219
5	360	260	264	250	232	232	230	232
6	331	236	220	232	232	231	230	232
7	1098	942	816	638	347	262	240	234
8	641	746	764	560	236	217	210	210
9	263	229	248	240	237	232	235	218

Прийнявши твердість у якості базового параметра з метою оцінки товщини азотованого шару (ГОСТ 20495–75), можна зробити висновок, що для неї зберігається та сама тенденція – зі зниженням енергетичних параметрів процесу БАТР товщина азотованого шару зменшується.

Ця закономірність характерна і для товщини нітридної зони (табл. 3).

Таблиця 3

Товщина модифікованого шару та нітридної зони сталей, азотованих в тліючому розряді

Режим	Товщина модифікованого шару, мм			Товщина нітридної зони, мкм		
	Сталь 45	40X	38X2МЮА	Сталь 45	40X	38X2МЮА
1	0,45	0,40	0,20	3,44	5,88	7,86
2	0,40	0,30	0,15	3,33	2,42	6,27
3	0,30	0,075	0,05	0	0	0
4	0,45	0,30	0,20	3,75	3,64	8,00
5	0,35	0,20	0,01	1,73	3,20	3,20
6	0,30	0	0,01	0	0	0
7	0,50	0,30	0,25	5,33	8,76	7,13
8	0,30	0,25	0,15	3,46	6,60	5,96
9	0	0	0	0	0	0

Дані рентгеноструктурного аналізу також свідчать про те, що структура та фазовий склад азотованих сталей теж залежать від енергетичних параметрів розряду.

Відомо, що при АТР одночасно відбуваються основні конкуруючі, взаємодоповнюючі і взаємозаперечувальні субпроцеси [2]: утворення нітридів, дифузійне насичення поверхневого шару азотом і розпорошення поверхні. Енергетичні умови перебігу головних субпроцесів суттєво відрізняються. Так, утворення нітридів відбувається при низьких енергіях, процес розпорошення поверхні навпаки активізується при високих значеннях напруги. І саме співвідношенням інтенсивностей перебігу основних

субпроцесів визначаються структура та фазовий склад модифікованих шарів. Залежно від поточної комбінації параметрів режиму формування модифікованого шару може відбуватися за різними напрямками, причому в кожній конкретній ситуації інтенсивність перебігу вказаних субпроцесів, а отже й інтенсивність утворення тієї чи іншої фази, може бути різною не лише за величиною, але й за знаком, оскільки попередньо створена фаза може знаходитись під впливом деструктивних явищ.

Наприклад, при підвищенні енергії падаючого потоку попередньо утворений прошарок нітридів розпорошується, а це у свою чергу стимулює процес дифузії азоту вглиб поверхні. Якщо ж енергія потоку часток виявляється недостатньою для розпорошення утворюваного нітридного шару, останній виступає у ролі своєрідного бар'єру, що унеможливорює процес дифузії. Останній факт пояснює неприйнятно низькі показники модифікованих поверхонь, отриманих при проведенні експериментів за режимами 3, 6, 9.

Згідно з результатами рентгеноструктурного аналізу при максимальних значеннях енергетичних параметрів формується азотований шар, що містить ϵ -, γ' - і α -фази. Зниження напруги і густини розрядного струму призводить до збільшення частки γ' -фази (Fe_4N) у нітридній зоні модифікованого шару і відповідно – до зменшення частки ϵ -фази (Fe_2N). При мінімальних значеннях енергетичних параметрів утворення нітридів на поверхні не спостерігалось, азотований шар містив тільки α -фазу.

Відомо, що товщина і фазовий склад нітридної зони визначають її властивості, а отже, в кінцевому підсумку, і властивості модифікованої сталеві поверхні. Так, нітридна зона, що містить лише γ' -фазу, характеризується достатньо високою пластичністю, зона ж, що містить ϵ -фазу, має меншу пластичність, але вищу корозійну стійкість. Найвища пластичність відповідає шару без нітридної зони. В цілому, чим тоншою є нітридна зона, тим більш пластичним є азотований шар, але тим нижчий опір абразивному зношуванню, особливо в умовах сухого тертя [3].

Таким чином, для деталей, що працюють у корозійному середовищі та на зношування при малих контактних навантаженнях процес БАТР повинен проводитись при максимально можливих значеннях напруги та густини струму, що забезпечить утворення ϵ -фази і, відповідно, високий опір корозії та припрацювання поверхонь тертя. Зниження значень енергетичних параметрів при проведенні БАТР призведе до збільшення частки γ' -фази, а отже, може бути рекомендоване для деталей, що працюють при високих динамічних навантаженнях в умовах зношування при високому тиску; корозійна стійкість при цьому буде знижена [4].

Залежність зносостійкості модифікованих поверхонь від енергетичних параметрів розряду було підтверджено при проведенні трибологічних досліджень. У результаті експериментів було виявлено, що в умовах сухого тертя для поверхонь, модифікованих при вищих енергетичних показниках, інтенсивність зношування і період припрацювання (рис. 2) зменшуються, а період сталого зношування збільшується, причому, зі збільшенням вмісту легованих елементів у сталі ця закономірність стає більш яскраво вираженою. Зрозуміло, що за інших умов проведення експериментів залежність трибологічних властивостей азотованих поверхонь від густини струму та напруги на електродах камери може набувати іншого характеру, але сам по собі факт існування такої залежності сумнівів не викликає, що спростовує наведені у роботі [5] положення, згідно з якими енергетичні характеристики розряду не здійснюють суттєвого впливу на результати БАТР.

Наведені дані дозволяють зробити цілком очевидний висновок щодо впливу напруги та густини струму на характеристики модифікованого шару, що є визначальними для зносостійкості азотованих у тліючому розряді сталей – він є не просто суттєвим, а вирішальним. Більше того – в області енергетичних параметрів режиму існує деяка межа, нижче якої проведення процесу АТР взагалі втрачає сенс, оскільки призводить до отримання неприйнятних результатів, і це попри те, що значення режимних залишаються постійними.

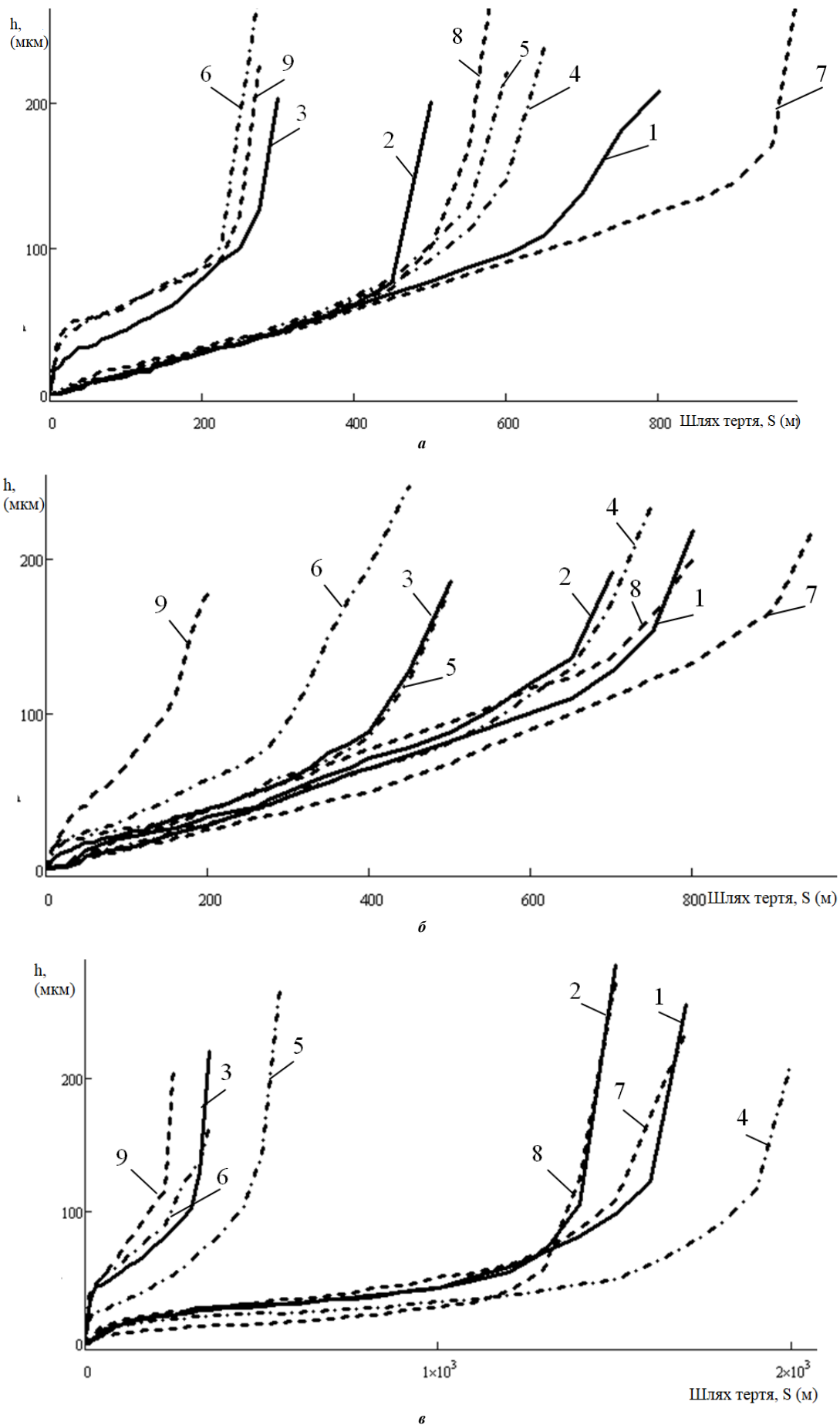
Це зокрема означає, що комплекс традиційно фіксованих режимних параметрів (температура, тиск, склад газової суміші та тривалість процесу) не дає однозначного уявлення про умови проведення процесу БАТР, а отже не може слугувати основою для прогнозування його результатів.

Цей факт знаходив своє неодноразове підтвердження, коли технологічні процеси, проведені за аналогічних значень режимних параметрів, але в різних установках (або навіть в одній установці, але з використанням іншої підвіски), призводили до абсолютно різних результатів.

Це пояснюється тим, що факторами, які визначають результативність процесу азотування у тліючому розряді, виступають не лише параметри режиму, але й такі показники, як міжкатодна відстань, форма та розміри підвіски і досліджуваного зразка (або деталі), наявність локальних виключень на його поверхні, концентраторів напруги і багато інших.

Перелік факторів, які є визначальними при азотуванні в тліючому розряді, наведений американським дослідником Девідом Пайєм (DavidPye) у роботі [6], включає тринадцять найменувань.

Зрозуміло, безпосереднє врахування усіх цих показників призвело б до неймовірного ускладнення керування процесом АТР. Проте, їх можна враховувати опосередковано, оскільки вплив усіх перерахованих факторів відображають енергетичні параметри процесу.



а – сталь 45; б – сталь 40Х; в – сталь 38Х2МЮА

Рис. 2. Криві зношування сталей, азотованих в тліючому розряді

На підтвердження цієї тези була проведена додаткова серія експериментів. Як уже зазначалося, зразки азотувалися у тій самій установці і при тих самих режимних параметрах, що й у дослідах 1, 4, 7 основної серії, але при цьому була використана підвіска іншої форми та розмірів, що спричинило зміну значень напруги та густини струму і суттєву відмінність між характеристиками відповідних азотованих шарів, отриманих в результаті проведення двох серій експериментів. Останнє ще раз підтверджує той факт, що результативність процесу БАТР значною мірою визначається енергетичними характеристиками розряду.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано ефективний спосіб апаратної реалізації процесу БАТР з незалежними параметрами, що полягає у модернізації обладнання, призначеного для поверхневої модифікації поверхонь деталей, інструменту та оснащення за допомогою вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій. Суттєвими перевагами запропонованого способу є простота реалізації, економічність і енергоефективність, що було підтверджено експериментальним шляхом;

2. Експериментально підтверджена залежність між результатами модифікації та енергетичними характеристиками розряду відкриває додаткові можливості в управлінні процесом БАТР, але це потребує розробки нових методів проектування технологічних процесів вказаного типу.

Література

1. Каплун В.Г. Ионное азотирование в безводородных средах : монография / В.Г. Каплун, П.В. Каплун. – Хмельницький : ХНУ, 2015. – 315 с.
2. Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде : монография / И.М. Пастух. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2006. – 164 с.
3. Скиба М.Є. Дослідження процесів безводневого азотування в тліючому розряді / М.Є. Скиба, М.С. Стечишин, В.П. Олександренко, В.С. Курської, А.В. Мартинюк // Проблеми трибології. – Хмельницький. – 2018. – № 2. – С. 6–16.
4. M. S. Stechyshyn, N. M. Stechyshyna, V. S. Kurskoi. Corrosion and Electrochemical Characteristics of the Metal Surfaces (Nitrided in Glow Discharge) in Model Acid Media March 2018, Volume 53, Issue 5, pp 724–731.
5. Keller K. Schichtaufbau glimmitrierten Eisenwerkstoffe / K. Keller // Harterei-Technische Mitteilung. – 1971. – Bd. 26, № 2. – S. 120–128.
6. Pye D. Practical Nitriding and FerriticNitrocarburizing / D. Pye. – Ohio – ASM International, 2003. – 260 p.

References

1. Kaplun V.G. Ionnoe azotirovanie v bezvodnorodnyh sredah : monografiya / V.G. Kaplun, P.V. Kaplun. – Hmelnickij : HNU, 2015. – 315 s.
2. Pastuh I.M. Teoriya i praktika bezvodnorodnogo azotirovaniya v tleyushem razryade : monografiya / I.M. Pastuh. – Harkov : NNC HFTI, 2006. – 164 s.
3. Skyba M.Ie. Doslidzhennia protsesiv bezvodnevoho azotuvannia v tliiuchomu rozriadi / M.Ie. Skyba, M.S. Stechyshyn, V.P. Oleksandrenko, V.S. Kurskoi, A.V. Martyniuk // Problemy trybolohii. – Khmelnytskyi. – 2018. – № 2. – S. 6–16.
4. M. S. Stechyshyn, N. M. Stechyshyna, V. S. Kurskoi. Corrosion and Electrochemical Characteristics of the Metal Surfaces (Nitrided in Glow Discharge) in Model Acid Media March 2018, Volume 53, Issue 5, pp 724–731.
5. Keller K. Schichtaufbau glimmitrierten Eisenwerkstoffe / K. Keller // Harterei-Technische Mitteilung. – 1971. – Bd. 26, № 2. – S. 120–128.
6. Pye D. Practical Nitriding and FerriticNitrocarburizing / D. Pye. – Ohio – ASM International, 2003. – 260 p.

Рецензія/Peer review : 6.4.2019 р. Надрукована/Printed : 1.6.2019 р.
Прорецензовано редакційною колегією