

Определение напряженного состояния вокруг отверстий в цилиндрической оболочке с композитного материала / Богатырчук А. С., Романенко В. Н. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 19(1241). – С16.–22. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Determination of the stress state around holes in a cylindrical shell made of a composite material / Bogatyrychuk A., Romanenko V. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 19 (1241).– P.16–22. – Bibliogr.:12. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Богатырчук Анатолий Степанович – кандидат фізико-математичних наук, Національний університет харчових технологій, доцент кафедри вищої математики імені проф. Можара В. І.; вул. Володимирська 68, м. Київ, Україна, 01601.

Романенко Вікторія Миколаївна – кандидат фізико-математичних наук, Національний університет харчових технологій, доцент кафедри вищої математики імені проф. Можара В. І.; вул. Володимирська 68, м. Київ, Україна, 01601.

Богатырчук Анатолий Степанович – кандидат физико-математических наук, Национальный университет пищевых технологий, доцент кафедры высшей математики имени проф. Можара В. И.; ул. Владимирская 68, г. Киев, Украина, 01601.

Романенко Викторія Николаевна – кандидат физико-математических наук, Национальный университет пищевых технологий, доцент кафедры высшей математики имени проф. Можара В. И.; ул. Владимирская 68, г. Киев, Украина, 01601.

Bogatyrychuk Anatolij – PhD of Physical and Mathematical Sciences, National University of Food Technologies, Associate professor V. I. Mozhar Higher Mathematics Department; str. Volodimirska 68, Kyiv, Ukraine, 01601.

Romanenko Victoriia– PhD of Physical and Mathematical Sciences, National University of Food Technologies, Associate professor V. I. Mozhar Higher Mathematics Department; str. Volodimirska 68, Kyiv, Ukraine, 01601.

УДК 621.723

О. Ю. РУДИК

ІОННЕ-АЗОТУВАННЯ: РЕГУЛЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Розглядається будова й фазовий склад іонно-азотованих шарів, встановлені залежності зміни параметрів кристалічних ґраток і концентрації азоту залежно від параметрів процесу. Розраховано зміцнення азотованих шарів на вуглецевих і легованих сталях для когерентних і некогерентних виділень нітридів. Одержані залежності значень зміцнення зони внутрішнього азотування від об'ємної долі частинок нітридів легуючих елементів, їх діаметра і відстані між частинками, що дозволяє одержувати дифузійні шари з максимальними міцнісними властивостями.

Ключові слова: іонне азотування, кристалічні ґратки, концентрація азоту, виділення нітридів, внутрішнє азотування.

Рассматривается строение и фазовый состав ионно-азотированных слоев, установлены зависимости изменения параметров кристаллических решеток и концентрации азота в зависимости от параметров процесса. Рассчитано упрочнение азотированных слоев на углеродных и легированных сталях для когерентных и некогерентных выделений нитридов. Получены зависимости значений упрочнения зоны внутреннего азотирования от объемной доли частиц нитридов легирующих элементов, их диаметра и расстояния между частицами, что позволяет получать диффузионные слои с максимальными прочностными свойствами.

Ключевые слова: ионное азотирование, кристаллические решетки, концентрация азота, выделение нитридов, внутреннее азотирование.

The regulation of physical and chemical properties of nitrogen-rich in the ion-plasma atmosphere of metal surfaces by changing the saturation parameters: temperature, pressure, composition of the saturated mixture and the duration of the strengthening process are considered. The result of the study is the determination of dependencies of changes in the parameters of crystalline lattices and nitrogen concentration, depending on the parameters of nitration. As a scientific novelty, the strengthening of nitrated layers on carbon and alloy steels for coherent and incoherent nitrides is calculated, and the dependences of the values of the strengthening of the internal nitriding zone on the volumetric fraction of nitride particles of the alloying elements, their diameter and the distance between the particles are obtained. The practical significance of the developed procedures and methods can be used for obtaining diffusion layers with maximum strength properties due to doping and control of morphology and the geometry of the allocation of nitride phases.

Keywords: ion nitriding, crystalline lattices, nitrogen concentration, nitride release, internal nitriding.

Вступ. У багатьох випадках вдається регулювати фізико-хімічні властивості азотованих в іонно-плазмовій атмосфері поверхонь металів шляхом зміни параметрів насичення: температури (T , К), тиску (P , Па), складу насичуючої суміші (C , % об. N_2) й тривалості насичення [1-3].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У роботі [1] визначені режими іонного

азотування (азотування в тліючому розряді), які забезпечують максимальні характеристики міцності, пластичності, опору втоми, коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування при терті кочення. Але знайдені режими азотування та відповідні їм експлуатаційні характеристики поверхонь не розглядаються у взаємозв'язку із структурним і фазовим станом її поверхні й не

© О. Ю. Рудик. 2017

аналізуються на основі загальних закономірностей фізики міцності та пластичності кристалічних тіл [4, 5]. Тим часом, саме ці напрями вивчення структурного стану поверхневих шарів, які визначають зносостійкість спряжень, найінтенсивніше розробляються в даний час, оскільки дозволяють встановити спільні закономірності зношування та руйнування металів.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є встановлення залежностей зміни параметрів кристалічних ґраток і концентрації азоту залежно від параметрів іонного азотування.

Задачею дослідження є розрахунок зміцнення азотованих шарів на вуглецевих і легованих сталях для когерентних і некогерентних виділень нітридів.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Вивчити будову й фазовий склад іонно-азотованих шарів.
2. Одержати залежності значень зміцнення зони внутрішнього азотування від об'ємної долі частинок

нітридів легуючих елементів, їх діаметра і відстані між частинками.

Матеріали та методи регулювання фізико-механічних властивостей при іонному-азотуванні. Для проведення досліджень були вибрані матеріали (хімічний склад визначали на квантометрі ДФС-51), наведені у табл. 1. Іонне азотування проводили на установці та за методикою, описаною в роботі [1].

Рентгеноструктурний фазовий аналіз поверхневих шарів зразків здійснювали на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2,00 з використанням хромового K_{α} -випромінювання. Параметри ґраток нітридних фаз визначали за методикою [6], а за співвідношенням інтенсивностей ліній (101) ϵ -фази, (111) γ' -фази й (110) α -фази проводили напівкількісний аналіз. Розрахунки періодів a і c ϵ -фази проводили за положенням максимумів (110) і (101), вміст впровадженого елемента визначали за відношенням c/a [6, 7]. Субмікроскопічну структуру нітридної зони вивчали на растровому електронному мікроскопі РЕМ-200.

Таблиця 1 – Склад і властивості досліджуваних сталей

Марка	Хімічний склад, %	Термообробка	Твердість, НВ
20	0,22C; 0,20Si; 0,41Mn; 0,11Cr; 0,04S; 0,03P	нормалізація	187
45	0,48C; 0,67Mn; 0,23Si; 0,20Cr; 0,04S; 0,03P	нормалізація	205
45X	0,46C; 0,30Si; 0,75Mn; 1,00Cr; 0,03S; 0,03P	поліпшення	302
38X2МЮА	0,40C; 0,35Si; 0,50Mn; 0,03P; 0,95Al; 1,45Cr; 0,20Mo; 0,03S	поліпшення	321

Результати дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів після іонного азотування. Насичення поверхонь металів в тліючому розряді відбувається в 1,5–2 рази інтенсивніше [3], що зумовлює нові корисні властивості іонно-азотованих матеріалів. Згідно [8] через 4 год. досягається рівновага між осадженням і розпилюванням. Тому основні дослідження властивостей азотованих покриттів були проведені

при тривалості процесу насичення 4 год.

Враховуючи, що зміна мікротвердості по глибині дифузійного шару характеризує співвідношення і розподіл структурних і фазових складових покриття, а також може служити мірою енергоємності поверхневих шарів [9], досліджений вплив параметрів іонного азотування на зміну мікротвердості (рис. 1, 2).

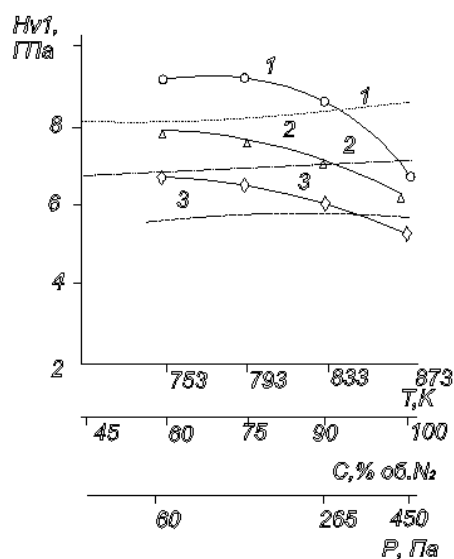


Рис. 1 – Залежність мікротвердості нітридної зони (—) від температури азотування, T , К; (---) від вмісту азоту C , % об.; (---) від тиску суміші, P , Па для наступних сталей: 1 – 45X; 2 – 45; 3 – 20

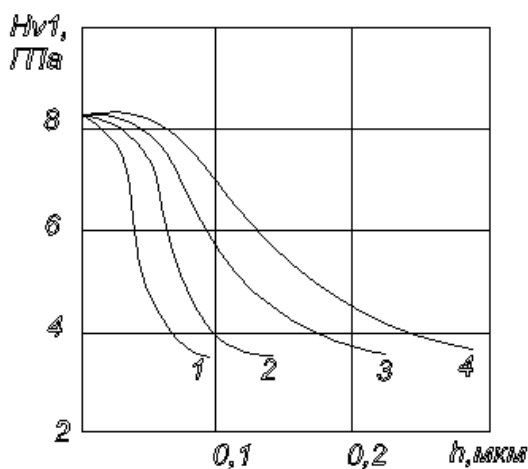


Рис. 2 – Розподіл мікротвердості $Hv1$ по глибині дифузійного шару азотованих зразків із сталі 45X (833 К, 75% N_2 + 25% Ar , 265 Па) наступною тривалістю: 1 – 1 год.; 2 – 2 год.; 3 – 4 год. і 4 – 6 год.

Встановлені наступні загальні закономірності зміни мікротвердості нітридної зони і дифузійного шару вивчених матеріалів залежно від параметрів іонного азотування:

1) максимальна величина мікротвердості підвищується залежно від збільшення вмісту вуглецю основи та кількості легуючих елементів (криві 1–3 на рис. 1);

2) з підвищенням температури азотування мікротвердість нітридної зони дифузійного шару знижується і швидкість зниження збільшується із збільшенням ступеня легування;

3) із збільшенням вмісту азоту і тиску насичуючої суміші мікротвердість зростає;

4) збільшення тривалості насичення при незмінних інших параметрах азотування, не змінюючи величини мікротвердості, сприяє плавнішому її переходу до твердості основи (рис. 2).

Підвищення мікротвердості металів після азотування пояснюється, в першу чергу, високою твердістю металевих нітридів, а оскільки твердість нітридів титана, цирконію, ванадію, хрому і молібдену значно вище за нітридів заліза [10], то і мікротвердість легуваних сталей також значно вище. Крім того, вирішальний вплив на величину і характер розподілу мікротвердості по глибині дифузійного шару має дисперсність нітридів заліза і легуючих елементів [3, 10]. Дослідження тонкої структури азотованого шару сталі 45X показали, що при температурі насичення 833 К

утворюються нітридні частинки завтовшки 30–100 і шириною 50–600, а при температурі 873 К завтовшки 80–200 і шириною 150–1000 кх. Тобто дисперсність нітридів підвищується з підвищенням температури азотування, відповідно знижується мікротвердість.

Аналіз впливу параметрів іонного азотування на зміну товщини нітридної зони h_N і дифузійного шару h показав можливість регулювання цих характеристик шару, в першу чергу, шляхом зміни температури азотування і складу насичуючого середовища (рис. 3). При збільшенні температури азотування відповідно збільшується як глибина дифузійного шару h , так і глибина нітридної зони h_N . При цьому найінтенсивніше зростання дифузійного шару h спостерігалось для вуглецевої сталі 45 (крива 2 залежності $h = f(T)$ на рис. 3), а найменше – для легованої сталі 38X2MЮА (крива 3). Останнє пояснюється низькою рухливістю азоту в нітридах легуючих елементів, які блокують дифузію в твердому розчині [3]. Однак глибина та інтенсивність зростання нітридної зони h_N , навпаки, збільшуються при збільшенні ступеня легування сталі (крива 3), що пояснюється збільшенням розчинності азоту в залізі при його легуванні нітридоутворюючими елементами, якими є більшість легуючих елементів (за винятком алюмінію і кремнію, які декілька знижують розчинність азоту [3, 11]). Утворені в нітридній зоні нітриди заліза і легуючих елементів затрудняють дифузію азоту углиб металу і перешкоджають розвитку зони внутрішнього азотування.

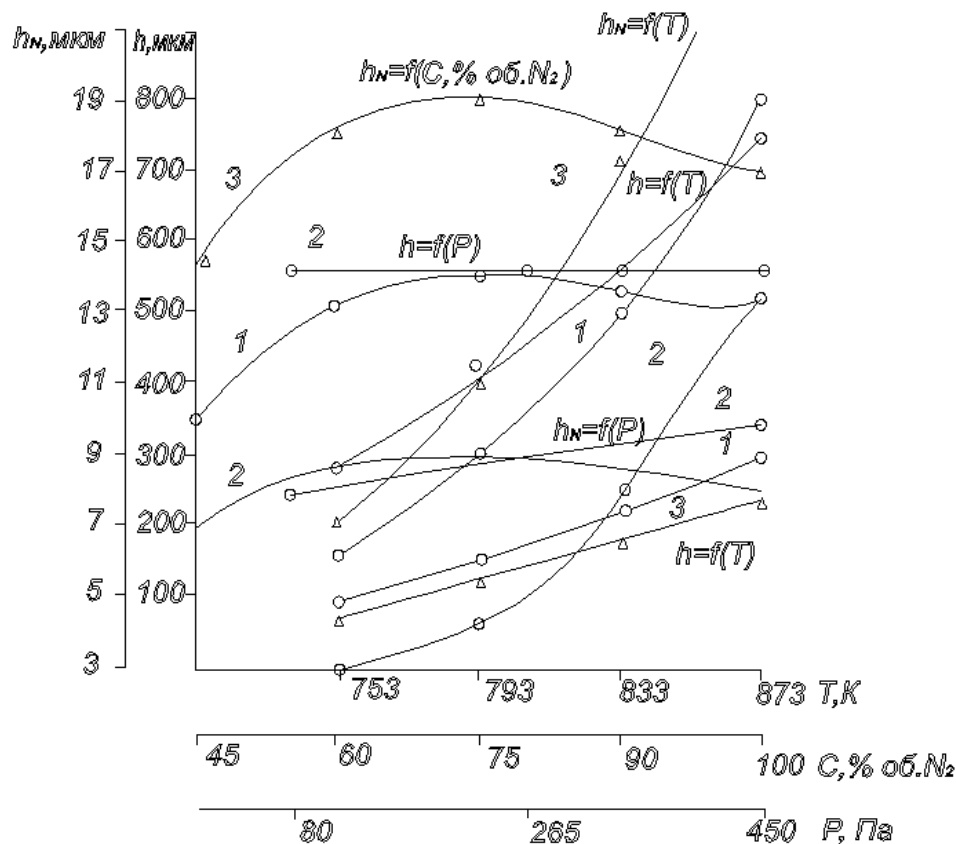


Рис. 3 – Залежність глибини дифузійного шару h і нітридної зони h_N від температури (-), концентрації азоту в насичуючій суміші (---) та її тиску (-·-) для сталей: 1 – 45X; 2 – 45; 3 – 38X2MЮА

З підвищенням концентрації азоту в насичуючій суміші до 75% збільшується товщина нітридної зони h_N , а подальше збільшення концентрації азоту приводить до зниження h_N , що, враховуючи меншу масу іонів азоту порівняно з іонами аргону, можливо? викликано погіршенням очищення поверхні металу [12] (рис. 3, залежності $h_N = f(C\%, N_2)$).

Збільшення тиску насичуючого середовища практично не змінює глибину дифузійного шару h , але декілька збільшує товщину нітридної зони (залежності $h = f(P)$ і $h_N = f(P)$ на рис. 3).

Для кількісного аналізу впливу параметрів іонного азотування на товщину і твердість азотованого шару з використанням методу Бокса-Уілсона проведений повний факторний аналіз. При 5 %-ному рівні значущості одержані наступні рівняння регресії:

$$y_1 = 255,00 + 18,25x_1; \quad (1)$$

$$y_2 = 15,60 + 0,94x_1 + 0,15x_2 + 0,19x_3; \quad (2)$$

$$y_3 = 7,29 - 0,65x_1 + 0,08x_2 + 0,18x_3, \quad (3)$$

де y_1 – загальна товщина дифузійного шару h , мм; y_2 – товщина нітридної зони h_N , мкм; y_3 – мікротвердість поверхні, HV1; x_1 – температура азотування, К; x_2 – вміст азоту в насичуючій суміші, % об. x_3 – тиск насичуючої суміші, Па.

Аналіз одержаних моделей (1)–(3) підтверджує раніше одержані результати і дозволяє по відомих параметрах іонного азотування визначити товщини ніт-

ридної та дифузійних зон, а також мікротвердість азотованої поверхні.

При металографічних дослідженнях все більша увага надається вивченню структурного стану поверхневих шарів для аналізу процесів зношування матеріалів на основі фізики міцності та пластичності кристалічних тіл [5]. Тому для сталі 45X за допомогою рентгеноструктурного аналізу визначені залежність відношення параметрів кристалічних ґраток c/a від концентрації азоту в поверхневому шарі K_N (рис. 4) і зміни параметрів кристалічних ґраток залежно від зміни режимів іонного азотування (рис. 5), що дозволяє кількісно оцінити міцнісні характеристики приповерхневого шару.

Дані рентгеноструктурного аналізу підтверджують результати металографічного аналізу. Однак зменшення співвідношення (c/a) з підвищенням концентрації азоту в газовій суміші (рис. 4), а також відхилення від прямолінійної залежності в області із вмістом 75 % азоту вимагають пояснення. Тому були побудовані залежності зміни параметрів кристалічних ґраток a і c від режимів іонного азотування (рис. 5). Звідси ясно, що із збільшенням концентрації азоту збільшується параметр a з одночасним зменшенням параметра c і при вмісті 75 % азоту швидкості зміни параметрів змінюються обернено пропорційно, що обумовлює постійність зміни співвідношення c/a .

Рентгеноструктурним аналізом встановлено, що незалежно від складу газової атмосфери (табл. 2) в поверхневому шарі утворюються ε -Fe_{2,3}N, γ -Fe₄N та α -фази. При цьому фазовий склад і співвідношення фазових структур в азотованому шарі можна регулювати шляхом зміни параметрів азотування (рис. 6 – 8).

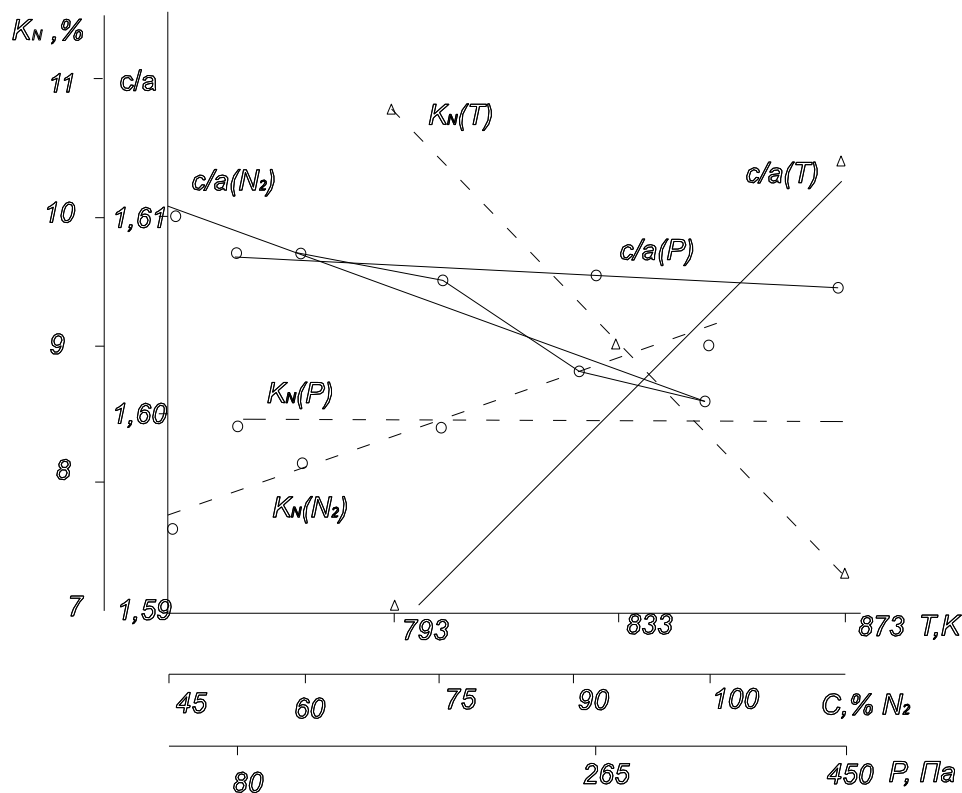
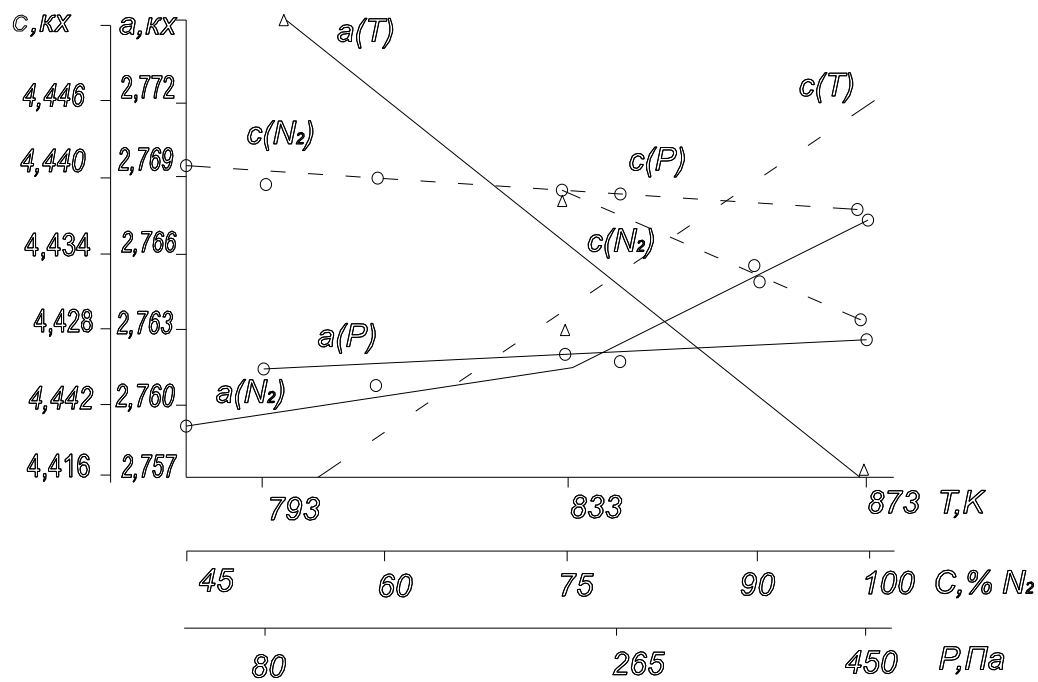
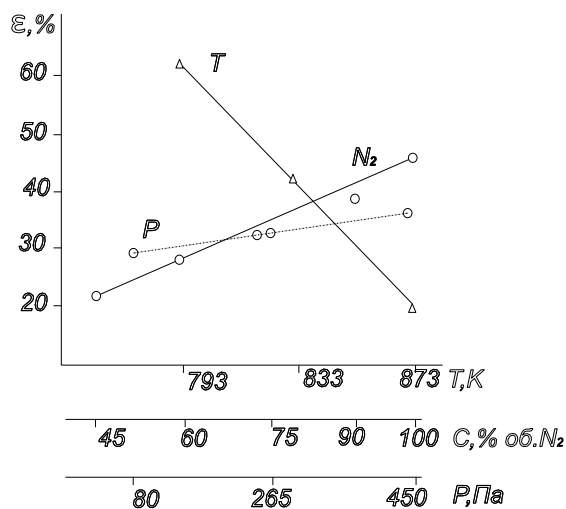
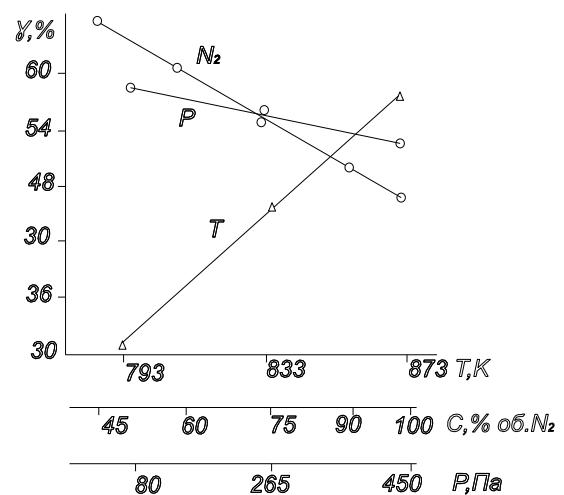


Рис. 4 – Залежність відношення параметрів кристалічних ґраток c/a від концентрації азоту в поверхневому шарі (K_N)

Рис. 5 – Залежність параметрів c і a від режимів азотування (T, C, P)Таблиця 2 – Параметри кристалічних ґраток (a ; c ; c/a); концентрація азоту в поверхневому шарі (K_N) і фазовий склад азотованих (843 К, 75 % N_2 , 265 Па, 4 год.) сталей

Показники	20	45	45X	38X2МЮА
$a, \text{кХ}$	2,775	2,757	2,761	2,764
$c, \text{кХ}$	4,443	4,441	4,439	4,436
c/a	1,613	1,611	1,608	1,605
$K_N, \%$	7,3	7,6	8,3	8,7
$\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}, \%$	19	21	31	45
$\gamma\text{-Fe}_4\text{N}, \%$	56	62	55	55
$\alpha\text{-Fe}, \%$	25	17	14	-

Рис. 6 – Залежність вмісту ε -фази дифузійного шару сталі 45X від режимів іонного азотуванняРис. 7 – Залежність вмісту γ' -фази дифузійного шару сталі 45X від режимів іонного азотування

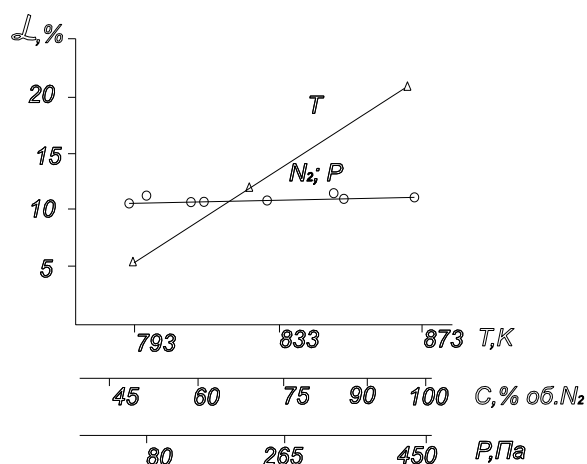


Рис. 8 – Залежність вмісту α -фази дифузійного шару сталі 45X від режимів іонного азотування

Аналіз одержаних залежностей показує, що найістотніше впливає на кількість утворення тих або інших фаз температура іонного азотування. Так, з її підвищенням зменшується кількість ε -фази у поверхневому шарі (рис. 6) і одночасно збільшується кількість γ' та α -фаз (рис. 7, 8). Із збільшенням азотного потенціалу насичуючої суміші та її тиску збільшується кількість ε -фази і зменшується кількість γ' -фази. При цьому концентрація азоту і тиск суміші не впливає на вміст α -фази (рис. 8), кількість якої контролюється тільки температурою процесу азотування.

Враховуючи різку відмінність фізико-механічних властивостей фазових структурних складових азотованого шару і можливість регулювання їх кількості та співвідношення між ними, з'являються широкі можливості отримання шарів із заданими експлуатаційними властивостями поверхні. Тому наступний етап дослідження – міцність і пластичність іонно-азотованих поверхневих шарів:

- для відкритих пар тертя із зростанням твердості поверхні підвищується їх здатність навантаження і довговічність роботи, тобто в цих випадках необхідний максимальний розвиток нітридної зони;

- для закритих пар тертя необхідно забезпечити: високу пластичність, мінімальну наклепуваність при деформації відповідно до правила позитивного градієнта механічних властивостей [13–15]; теплофізичні властивості, які гарантують теплове розвантаження поверхонь тертя при виникненні температурних спалахів [14, 15].

Позитивний градієнт механічних властивостей при азотування може створюватися за рахунок м'якої зони нітриду Fe_3N , який спирається на тверду зону γ' -фази для вуглецевих сталей і на високоміцну зону внутрішньої азотування високолегованих сталей.

Нітриди заліза володіють більшою теплоємністю порівняно із залізом, що зменшує можливість виникнення температурних спалахів. Спорідненість до кисню нітридів заліза і нітридів легуючих елементів значно вище, ніж заліза [3]. При цьому внаслідок того, що розчинність кисню приблизно на три порядки вища, ніж в матриці, на поверхні нітридів формуються окисні структури першого роду [3], які пластичніше окисних

плівок Fe_2O_3 , й одночасно володіють близькими до останніх антиадгезійними властивостями [16].

Таким чином, азотовані шари, з урахуванням регульованості їх фазового складу, надають широкі можливості досягнення оптимальних характеристик процесу тертя залежно від умов роботи фрикційного контакту. Однак, фізика міцності й пластичності іонно-азотованих шарів при терті вивчена недостатньо.

Найбільший вплив на зносостійкість азотованих шарів, як вже відмічено вище, робить зона внутрішньої азотування, тобто її міцнісні та пластичні характеристики. Зміцнення при формуванні зон внутрішньої азотування, виходячи з уявлень дислокацій – результат гальмування дислокацій виділеннями нітридів заліза і легуючих елементів. Тому на основі моделей Орована і Мотті-Набарро [17] можна розрахувати ступінь зміцнення зон внутрішнього азотування.

Згідно уточнень ряду авторів, варіант формули Орована для напружень течії має вигляд:

$$\Delta\tau = 0,85 \frac{Gb}{2\pi(\lambda - 2r)} 0,5(1 + (1 - \nu)) \ln \frac{\lambda - 2r}{2b}, \quad (4)$$

де $\Delta\tau$ – величина зміцнення; G – модуль зсуву матеріалу матриці; b – вектор Бюргерса; r – радіус частинок; λ – відстань між центрами частинок; ν – коефіцієнт Пуассона матеріалу частинок.

Виходячи з результатів власних досліджень тонкої структури азотованих шарів, а також аналізу літературних даних [3, 18] проведений розрахунок в широких межах зміни діаметру нітридних частинок (5-1000) нм і відстані між їх центрами (5-2000) нм з використанням значень початкових даних з [18].

Одержані дані (рис. 9) свідчать, що із збільшенням розміру дисперсних фаз і відстані між виділеннями опір зон внутрішньої азотування пластичній деформації зсуву зменшується.

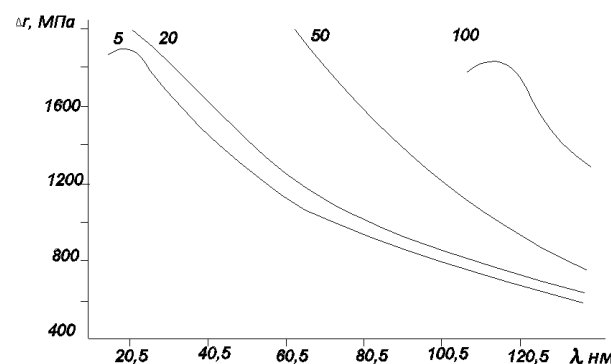


Рис. 9 – Залежність ступеня зміцнення зони внутрішньої азотування заліза $\Delta\tau$ по Оравану (λ – відстань між центрами частинок, цифри на кривих – діаметр частинок, нм)

Мотті і Набарро порівнюють напруження течії із середнім арифметичним величин внутрішнього напруження:

$$\tau = 2G\varepsilon f_v, \quad (5)$$

де G – модуль зсуву матеріалу матриці; $\varepsilon = \frac{3K\delta}{\delta K + 4G}$,

де K – об'ємний модуль матеріалу частинки; $K = E/(3(1-\nu))$, де E – модуль Юнга матеріалу частинки; ν – коефіцієнт Пуассона матеріалу частинки; δ – параметр невідповідності кристалічних ґраток матриці ($\delta = c/a$); $f_v = (0,81 d/\lambda)^3$ – об'ємна доля частинок, що виділяються; λ – відстань між центрами частинок; d – діаметр частинок.

З урахуванням вищевикладеного, формула визначення критичного напруження зсуву має вигляд:

$$\tau \approx \frac{2EG \cdot c/a}{E + 4G(1-\nu)} f_v, \quad (6)$$

де c/a – ступінь спотворення кристалічних ґраток матриці.

Розрахунок, проведений за формулою (6), показав, що величина зміцнення зони внутрішнього азотування залежить від об'ємної частки нітридів, які виділяються, та їх природи (рис. 10). При цьому зміцнююча дія нітридів легуючих елементів (Ti, Cr, Zr, W, Al та ін.) приблизно однакова (прямі 1, 2 на рис. 10). Зокрема, аналіз зміни модуля пружності матеріалів різних класів при кімнатній температурі [18] і теоретичний розрахунок за рівнянням Мотто-Набарро вказує на ефективність зміцнюючої дії фаз карбідів легуючих елементів типу $(Fe, Me)_n(NC)$ або $(Fe, Me)_n(NCO)$, тобто карбонітридних і карбооксинітридних фаз.

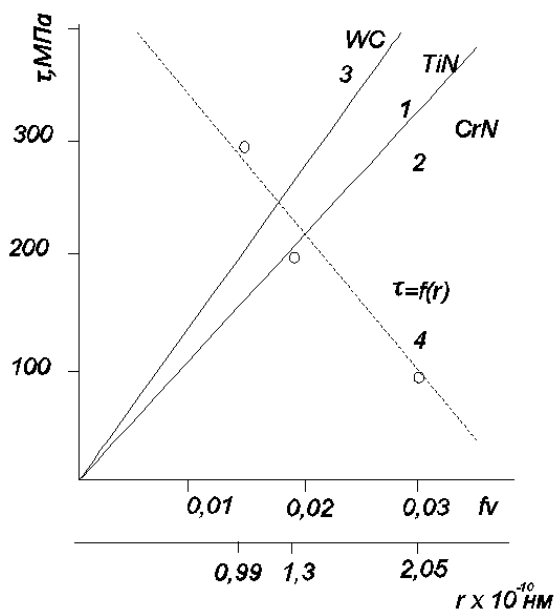


Рис. 10 – Вплив об'ємної частки нітридів f_v (1,2) і карбідів вольфраму (3), а також радіуса дисперсних нітридних частинок r (4) на величину зміцнення зони внутрішнього азотування залізної матриці (модель Мотто-Набарро)

Представивши формулу Орована (4) в декілька іншому вигляді, одержимо:

$$\tau \approx 0,6 \frac{Gb}{r} \sqrt[3]{f_v}, \quad (7)$$

де b – вектор Бюргерса; r – радіус зміцнюючої частинки; f_v – об'ємна концентрація зміцнюючої фази.

Обговорення результатів дослідження регулювання фізико-механічних властивостей сталей після іонного азотування. Аналіз формули (7) показує, що ефект зміцнення істотно залежить від розміру частинок, що виділяються, і слабше від загального вмісту другої фази. На рис 7 (пряма 4) показана можливість досягнення зміцнення матриці вуглецевих сталей 20 і 45 за рахунок дисперсності нітридних частинок, що виділяються. З графіка видно, що для збільшення ступеня зміцнення по напруженнях зсуву в 3 рази необхідно зменшити дисперсність частинок в 2 рази. Експериментально показано, що при азотування низьколегованих сталей зміцнення може досягати до 300–400 МПа, а із збільшенням ступеня легуваності $\Delta\tau$ зростає (наприклад, для сталі 38Х2МЮА $\Delta\tau = 780$ –800 МПа) [3, 18]. Однак теоретично ступінь зміцнення може досягати величини від 45 до 5000 МПа, що дозволяє різко збільшити міцність дифузійного шару.

Таким чином, проведений розрахунок зміцнення азотованого шару вуглецевих сталей за теорією Мотто-Набарро для когерентних виділень нітридів і за теорією Орована для некогерентних виділень показав, що існуюча технологія іонного азотування не дозволяє досягти теоретично можливого рівня зміцнення дифузійного шару. Однак, розглянуті методики розрахунку зміцнення зон внутрішнього азотування показують шляхи підвищення міцності азотованих матеріалів як за рахунок раціонального легування, так і за рахунок зміни дисперсності нітридних частинок.

Висновки. В результаті проведених досліджень:

1. Вивчена будова й фазовий склад іонно-азотованих шарів, а також рентгеноструктурним аналізом встановлені залежності зміни параметрів кристалічних ґраток і концентрації азоту залежно від параметрів іонного азотування.

2. Проведений розрахунок зміцнення азотованих шарів на вуглецевих і легуваних сталях для когерентних і некогерентних виділень нітридів, показує значне невикористання можливостей сучасної технології азотування по зміцненню матриці основного матеріалу, міцність якої може досягати 5000 МПа.

3. Одержані залежності значень зміцнення зони внутрішнього азотування від об'ємної долі частинок нітридів легуючих елементів, їх діаметра і відстані між частинками, що дозволяє одержувати дифузійні шари з максимальними міцнісними властивостями за рахунок легування та управління морфологією й геометрією виділення нітридних фаз.

Список літератури:

1. Каплун, В. Г. Ионное азотирование в безводородных средах [Текст]: монография / В. Г. Каплун, П. В. Каплун. – Хмельницький: ХНУ, 2015. – 315 с.
2. Лахтин, Ю. М. Азотирование сталей [Текст] / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М.: Машиностроение, 1976. – 175 с.
3. Лахтин, Ю. М. Структура и прочность азотированных сплавов [Текст] / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.
4. Алехин, В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов [Текст] / В. П. Алехин. – М.: Наука, 1983. – 280 с.

5. Рыбакова, Л. М. Структура и износостойкость металла [Текст] / Л. М. Рыбакова, Л. И. Куксенова. – М.: Машиностроение, 1982. – 209 с.
6. Миркин, Л. И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов [Текст]: справочник / Л. И. Миркин. – М.: Машиностроение, 1979. – 134 с.
7. Масабуми, Я. Строение и свойства слоев, полученных при азотировании стали [Текст] / Я. Масабуми // Дэнки сэйко. – 1978. – Т. 49. – С. 35–42.
8. Zaat, J. H. Diffusielayeren vor het verminderen van Stijtage bij glidende wrijving [Text] / J. H. Zaat // Polytechnisch tijdschrift. – 1978. – Vol. 33, Issue 6. – P. 302–310.
9. Погодаев, Л. И. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования [Текст] / Л. И. Погодаев, П. А. Шевченко. – Л.: Судостроение, 1984. – 264 с.
10. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов [Текст] / И. И. Новиков. – М.: Metallurgizdat, 1978. – 390 с.
11. Арзамасов, Б. Н. Химико-термическая обработка в активизированных газовых средах [Текст] / Б. Н. Арзамасов. – М.: Машиностроение, 1979. – 224 с.
12. Арзамасов, Б. Н. Ионное азотирование сплавов [Текст] / Б. Н. Арзамасов, А. В. Виноградов, А. В. Велицанский // Новые сплавы и методы упрочнения деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – С. 105–117.
13. Гаркунов, Д. Н. Триботехника [Текст] / Д. Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
14. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
15. Hirth, F. W. Zur Kavitation von Kupferlegierungen in Hydraulikflüssigkeiten [Text] / F. W. Hirth, H. Speckhardt // Metall (W.-Berlin). – 1985. – Vol. 29, Issue 11. – P. 1106–1110.
16. Физико-химические свойства окислов [Текст]: справочник / под ред. Г. В. Самсонова. – М.: Metallurgiya, 1969. – 389 с.
17. Келли, А. Дисперсионное твердение [Текст] / А. Келли, Р. Никлсон. – М.: Metallurgiya, 1966. – 300 с.
18. Гольдштейн, М. И. Дисперсионное упрочнение конструкционных сталей [Текст] / М. И. Гольдштейн // МитОМ. – 1975. – № 11. – С. 50–56.
- bezvodородnyh seredah. Khmel'nic'kiy: HNU, 315.
2. Lahtin, Yu. M., Kogan, Ya. D. (1976). Azotirovanie staley. Moscow: Mashinostroenie, 175.
3. Lahtin, Yu. M., Kogan, Ya. D. (1982). Struktura i prochnost' azotirovannyh splavov. Moscow: Metallurgiya, 176.
4. Alekhin, V. P. (1983). Fizika prochnosti i plastichnosti poverkhnostnyh sloev materialov. Moscow: Nauka, 280.
5. Rybakova, L. M., Kuksenova, L. I. (1982). Struktura i iznosostoykost' metalla. Moscow: Mashinostroenie, 209.
6. Mirkin, L. I. (1979). Rentgenostrukturnyy kontrol' mashinostroitel'nyh materialov. Moscow: Mashinostroenie, 134.
7. Masabumi, Ya. (1978). Stroenie i svoystva sloev, poluchennyh pri azotirovanii stali. Dehnki sehyko, 49, 35–42.
8. Zaat, J. H. (1978). Diffusielayeren vor het verminderen van Stijtage bij glidende wrijving. Polytechnisch tijdschrift, 33 (6), 302–310.
9. Pogodaev, L. I., Shevchenko, P. A. (1984). Gidroabrazivnyy i kavitacionnyy iznos sudovogo oborudovaniya. Leningrad: Sudostroenie, 264.
10. Novikov, I. I. (1978). Teoriya termicheskoy obrabotki metallov. Moscow: Metallurgizdat, 390.
11. Arzamasov, B. N. (1979). Himiko-termicheskaya obrabotka v aktivizirovannyh gazovyh sredah. Moscow: Mashinostroenie, 224.
12. Arzamasov, B. N., Vinogradov, A. V., Velishchanskiy, A. V. (1981). Ionnoe azotirovanie splavov. Noveye splavy i metody uprochneniya detaley mashin. Moscow: Mashinostroenie, 105–117.
13. Garkunov, D. N. (1985). Tribotekhnika. Moscow: Mashinostroenie, 424.
14. Kragel'skiy, I. V., Dobychin, M. N., Komalov, V. S. (1977). Osnovy raschetov na trenie i iznos. Moscow: Mashinostroenie, 526.
15. Hirth, F. W., Speckhardt, H. (1985). Zur Kavitation von Kupferlegierungen in Hydraulikflüssigkeiten. Metall (W.-Berlin), 29 (11), 1106–1110.
16. Samsonov, G. V. (Ed.) (1969). Fiziko-himicheskie svoystva okislov. Moscow: Metallurgiya, 389.
17. Kelli, A., R. Niklson (1966). Dispersionnoe tverdenie. Moscow: Metallurgiya, 300.
18. Gol'dshteyn, M. I. (1975). Dispersionnoe uprochnenie konstrukcionnyh staley. МитОМ, 11, 50–56.

Bibliography (transliterated):

1. Kaplun, V. G., Kaplun, P. V. (2015). Ionnoe azotirovanie v

Надійшла (received) 26.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Ионне-азотування: регулювання фізико-механічних властивостей/ О. Ю. Рудик/ Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 19(1241). – С.22–29. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-5459.

Ионное-азотирование: регулирование физико-механических свойств/ А. Е. Рудык/ Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 19(1241). – С.22–29. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-5459.

Ion-nitriding: regulation of physical and mechanical properties/ A. Rudyk//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 19 (1241). – P.22–29. – Bibliogr.:18. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Рудик Олександр Юхимович – кандидат технічних наук, доцент, кафедра зносостійкості та надійності машин, Хмельницький національний університет, вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016, e-mail: arudyk@rambler.ru.

Рудык Александр Ефимович – кандидат технических наук, доцент, кафедра износостойкости и надежности машин, Хмельницкий национальный университет, ул. Институтская, 11, г. Хмельницкий, Украина, 29016, e-mail: arudyk@rambler.ru.

Rudyk Alexandre – candidate of technical sciences, Khmel'nitskii National University, e-mail: arudyk@rambler.ru.