

Утворення твердих розчинів та фаз втілення за умов іонного бомбардування металів у жевріючому розряді

Д. С. Герцрікен, кандидат фізико-математичних наук, deciatinka@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7493-9761>

В. Ф. Мазанко, доктор технічних наук, професор, vmazancko@imp.kiev.ua,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7549-352X>

Д. В. Міронов*, кандидат фізико-математичних наук, alexstovn007@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9947-5166>

С. Є. Богданов, кандидат фізико-математичних наук, besal@bigmir.net,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3409-2487>

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ
Самарський державний аграрний університет, Росія, Самара

Методами, що базуються на застосуванні радіоактивних індикаторів ^{55}Fe , ^{44}Ti , ^{14}C , ^{13}N , ^{85}Kr , ^{41}Ar (пошаровий радіометричний аналіз залишкової інтегральної активності, макро- та мікроавторадіографія, активаційна авторадіографія), а також металографії, мікрорентгеноспектрального і рентгеноструктурного аналізів та ін. досліджено закономірності взаємодії заліза, сталей, нікелю, міді, титану з легкими елементами та інертними газами у плазмі жевріючого розряду. Обробка здійснювалася за діодною схемою з параметрами 1 – 55 годин, 0,2 – 2 кВ, ~ 500 К. Для обробки в розряді використовувалися нейтральні (аргон, криптон) та насичуючі (азот, аміак, метан) середовища, а також проводилася подальша обробка у нейтральному середовищі попередньо насичених азотом чи вуглецем металів.

Встановлено, що в процесі введення в метали (Fe, Ti) при дії жевріючого розряду, у насичуючому середовищі, атомів, розчинних за рівноважних умов елементів (N, C), виникають розчини та фази втілення, які відрізняються від тих, що утворюються при ізотермічних відпалях, лише наявністю пересичених твердих розчинів та деяким порушенням стехіометрії карбідів та нітридів, а також більш різким зменшенням концентрації легуючої домішки по мірі збільшення відстані від поверхні. Форма концентраційних профілів за межами шару фази втілення описується експоненційною залежністю від квадрату глибини проникнення. Щодо проникнення у мідь атомів азоту, вуглецю, аргону чи криптону, нерозчинних за рівноважних умов, то при іонному бомбардуванні у відповідних середовищах від обробленої поверхні і до кінця дифузійної зони має місце лише твердий розчин із концентрацією, яка знижується за експонентою.

Подальша обробка насичених легкими елементами нікелю, заліза та сталей шляхом бомбардування іонами аргону та криптону призводить до перерозподілу легуючих домішок, виділенню фаз втілення переважно на границях зерен, поверхні або на деякій відстані від

Фазові перетворення

поверхні, що сприяє деякому порушенню форми концентраційного профілю. При обробці попередньо насиченої міді фази втілення не виникають, але вид профілю кардинально змінюється, однак від максимуму і до кінця дифузійної зони описується експонентою.

Показано, що використання насичуючих і нейтральних середовищ, а також їх послідовне застосування для обробки в жевріючому розряді дає можливість створювати задані профілі легування і вводити необхідну кількість легуючої добавки.

Ключові слова: жевріючий розряд, радіоактивні ізотопи, легкі елементи, інертні гази, дифузія, утворення фаз та твердих розчинів.

Відомо, що крім проникнення атомів інертних газів в об'єм оброблюваного металу іонне бомбардування в жевріючому розряді навіть без додаткового нагріву сприяє перерозподілу атомів металевих покриттів на металах, що опромінюються, і їх проникненню в глиб на значні відстані [1-3]. Це відноситься як до власних атомів, так і до атомів тих елементів, які створюють тверді розчини заміщення, і навіть до нерозчинних в рівноважних умовах, зокрема цезій та талій у залізі, алюмінії тощо. Однак розгляд особливостей поведінки атомів поверхневого шару під дією іонного бомбардування був би неповним без вивчення впливу інертних газів на атоми елементів, що утворюють з металами тверді розчини втілення та вилучення, а також фази втілення.

Обробку металів в жевріючому розряді здійснювали в камері діодного типу діаметром 150 мм, виготовленої з неіржавіючої сталі за методикою [2]. Відстань між анодом, що представляє собою порожнистий молібденовий циліндр діаметром 30 мм і довжиною 40 мм, і катодом залежно від форми і розміру зразків змінювалося в межах 150 – 200 мм. Зразки мали форму циліндрів висотою і діаметром 10 мм. З метою отримання порівнянних результатів іонну бомбардування зразків проводили або всіх одночасно, або шляхом послідовного опромінення. Для послідовної обробки проводилася їх зміна на катоді в процесі іонного бомбардування. З використанням спеціальної касети, що містить виготовлену з окису цирконію трубку і втулку із фторопласту для кріплення зразків і захисту їх бічних поверхонь. Для одночасної обробки зразки поміщали в сталеву обойму (катод) діаметром 60 мм, в якій вони розташовувалися по колу діаметром 50 мм симетрично щодо анода. Зразки (касету або обойму) поміщали у вакуумну камеру, яку відкачували до 10^{-4} Па і заповнювали через систему напуску і очищення газовим середовищем до тиску 10 - 1500 Па. Газовими середовищами служили аміак, азот, аргон, мічений по вуглецю (^{14}C) метан, криптон, суміш аргону з невеликими добавками р/а ізотопів аргону ^{41}Ar або криптону ^{85}Kr та ін. Щільність струму становила 0,5 - 40 мА/см² і обмежувалася як режимом горіння розряду, так і температурою зразків, що не перевищувала 473 - 493 К. Це дозволяло обробляти практично будь-які струмопровідні матеріали в режимі нормального жевріючого розряду. Напругу між анодом і катодом, яка визначає енергію іонів, варіювали від 0,4 - 2 кВ. Тривалість бомбардування в розряді змінювалася від 1 год до 55 год. Радіоактивні і стабільні ізотопи легких елементів і інертних газів (С, N, Ar ...) наносили на поверхню зразків у твердому карбюризаторі (BaCO_3), насиченням з газовою

Фазові перетворення

фази, попередньою обробкою в жевріючому розряді. У ряді експериментів на поверхню металів наносили їх радіоактивні ізотопи у вигляді гальванічних покриттів. У кожному експерименті використовували лише один р/а ізотоп.

Дослідження, спрямовані на з'ясування особливостей дифузійного проникнення атомів поверхневого шару та іонів газового середовища, проводилися за допомогою макро-, мікро- і електронномікроскопічної авторадіографії, активаційної авторадіографії, металографії, пошарових радіометричного і рентгеноструктурного аналізів.

Розглянемо поведінку легких елементів в металах, оброблених в плазмі жевріючого розряду, що горить у середовищах, які є нейтральними або такими, що насичують приповерхневий шар металу. Як нейтральні середовища застосовували стабільні аргон, криптон, радіоактивний ізотоп криптому ^{85}Kr , а для насичення використовувалися середовища азоту і метану, в тому числі і з добавкою міченого по вуглецю ^{14}C . У другому випадку в приповерхневий шар попередньо вводили азот або вуглець шляхом дифузійного відпалу чи в жевріючому розряді у відповідному середовищі. Тобто при першій схемі обробки легуючі атоми весь час надходять в приповерхневий шар з середовища, а при другій – їх вміст в шарі обмежений тією кількістю, що була введена попередньо.

Проведені експерименти показали (рис. 1), що при азотуванні заліза у жевріючому розряді в середовищі азоту або аміаку, на поверхні виникає щільний шар нітриду, переважно $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ з частково порушеною стехіометрією (надлишок заліза), але при цьому зберігається гранецентрована симетрія Fe_4N .

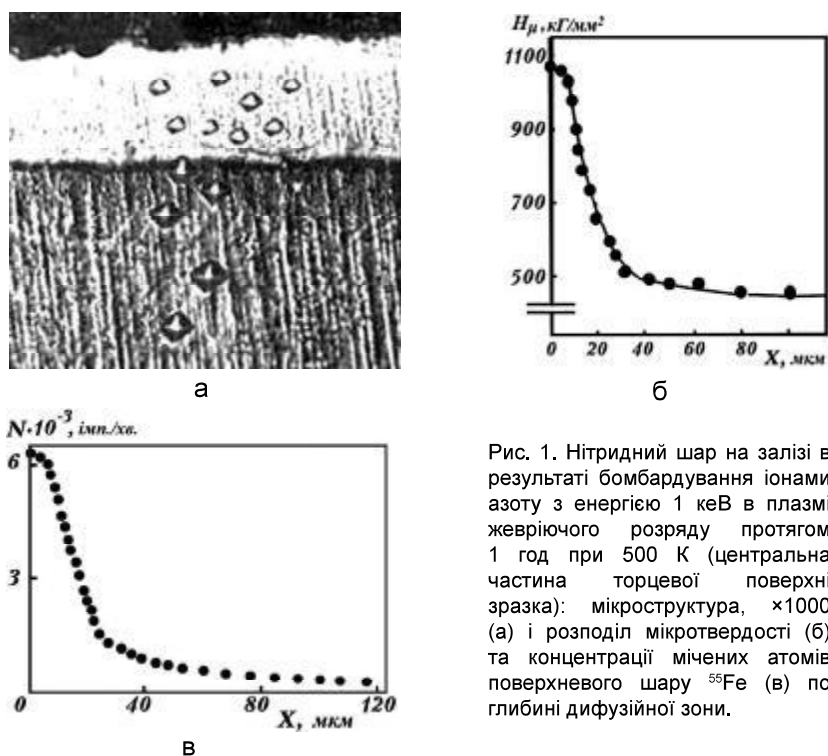


Рис. 1. Нітридний шар на залізі в результаті бомбардування іонами азоту з енергією 1 кеВ в плазмі жевріючого розряду протягом 1 год при 500 К (центральна частина торцевої поверхні зразка): мікроструктура, $\times 1000$ (а) і розподіл мікротвердості (б) та концентрації мічених атомів поверхневого шару ^{55}Fe (в) по глибині дифузійної зони.

Фазові перетворення

Параметр ґратки нітриду Fe_4N а не перевищує 0,3790 нм. За рівноважних умов параметр а змінюється від 0,3791 до 0,3801 нм [4] залежно від співвідношення вмісту заліза та азоту.

Зростання шару можна з достатньою точністю описати параболічною залежністю товщини (d) від часу обробки. За перші півгодини (при енергії 1 кеВ) товщина шару досягає близько 6 - 8 мкм. Більш товстий шар спостерігається в центральній частині зразка, а по краях він більш тонкий через процес розпилення [5]. Після 1 години обробки максимальне значення d становить ~ 11 мкм, після 10 год - ~ 18 мкм. Обробка протягом доби сприяла наростанню нітридного шару завтовшки ~ 25 мкм. При цьому склад нітриду на поверхні шару при обробці від 30 хв до 24 год був постійним і найбільш близький до Fe_4N . У той же час склад шару поблизу металу, тобто нижньої сторони шару, точніше співвідношення заліза і азоту змінюється залежно від тривалості впливу. Так, після 1 год іонного бомбардування на рентгенограмах з'являються лінії орторомбічної фази Fe_2N , і їх інтенсивність зростає при збільшенні часу обробки. Можна припустити, що крім утворення вищих нітридів відбувається їх часткова дисоціація, а вивільнені атоми азоту проникають в глиб заліза. Дійсно, крім спостережуваного шару нітриду утворюється також протяжна дифузійна зона, що складається з твердого розчину азоту в залізі зі змінною концентрацією. Максимальне значення в шарі, розташованому безпосередньо під нітридним шаром, трохи перевищує 0,5 %. Отже, спостерігається утворення пересиченого твердого розчину $\alpha\text{-Fe}$. Аналіз форми профілю розподілу азоту в залізі показав, що подібно проникненню власних атомів у залізі, він досить коректно описується експоненційною залежністю від квадрата глибини проникнення. Дослідження отриманої в аналогічних умовах бомбардування іонами азоту залізної фольги, показало, що розчинення азоту в залізі відбувається за типом втілення. Цікаво, що нижче шару нітриду в дифузійній зоні поблизу поверхні крім азотистого мартенситу фіксуються в невеликій кількості високодисперсні нітриди заліза, розподілені у об'ємі твердого розчину. І навіть на середині дифузійної зони зустрічаються їх сліди. Таким чином, одночасно з дифузією атомів азоту в залізо відбувається їх розчинення за типом втілення, а також часткове впорядкування твердого розчину.

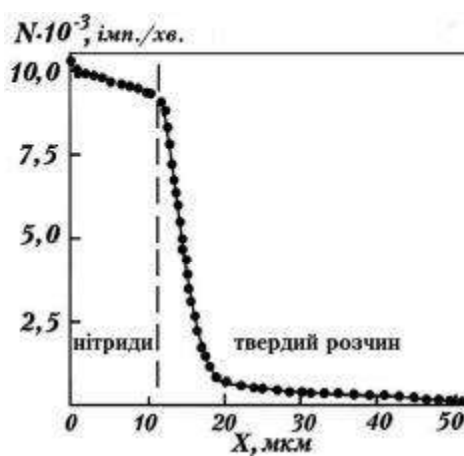
Слід зауважити, що обробка заліза в середовищі дисоційованого метану за аналогічних умов розряду призводить до утворення на поверхні заліза тонкого шару, який складається переважно з цементиту та невеликої кількості мартенситу з концентрацією близько до 1 %. В дифузійній зоні присутні незначні скупчення Fe_3C , а вміст вуглецю у пересиченому твердому розчині зменшується за експоненціальним законом, і на границі дифузійної зони та чистого металу присутній лише ферит.

Взаємодію титану з азотом в плазмі жевріючого розряду, в середовищі дисоційованого азоту, ілюструє рис. 2. Як впливає з рисунка, на титані також утворюється азотований шар з високою мікротвердістю. Склад нітридного шару змінюється від приблизно TiN на поверхні до Ti_{10}N_6 біля твердого розчину азоту в титані. При цьому при всіх співвідношеннях титану та азоту зберігається градецентрована симетрія ґратки.

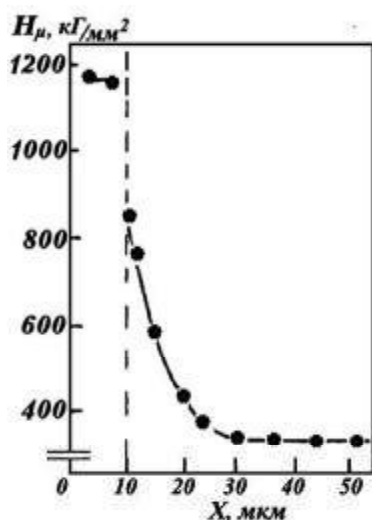
Фазові перетворення



а



б



в

Рис. 2. Мікроструктура, $\times 1000$ (а), розподіл мічених атомів ^{44}Ti у титані, які продифундували з поверхні в процесі обробки (б), і мікротвердість (в) по глибині азотованого титану, обробленого в розряді протягом 1 год.

Отже в процесі введення азоту та вуглецю при дії жевріючого розряду в залізо і титан атомів елементів, розчинних за рівноважних умов, виникають розчини та фази втілення, які відрізняються від тих, що утворюються при ізотермічних відпалах, лише наявністю пересичених розчинів та деяким порушенням стехіометрії карбідів та нітридів, а також більш крутим спаданням концентрації при збільшенні відстані від поверхні.

При насиченні міді азотом безпосередньо в плазмі жевріючого розряду в середовищі азоту утворюється тільки метастабільний твердий розчин азоту в міді, концентрація якого зменшується з відстанню від поверхні за експоненціальним законом. Нітридів міді, які за рівноважних умов утворюються при нагріванні тільки при взаємодії з аміаком, при імпульсній дії не спостерігалось. При обробці міді у середовищі метану $^{14}\text{CH}_4$ виникають лише тверді розчини втілення, в яких залежність концентрації вуглецю в дифузійній зоні описується експоненціальним законом від квадрату глибини

Фазові перетворення

проникнення, тобто ми спостерігаємо об'ємну дифузію. Зазначимо, що при бомбардуванні міді аргоном або криптоном, тобто у нейтральному середовищі за аналогічних умов, виникають однакові за формою та протяжністю концентраційні профілі розподілу атомів аргону ^{41}Ar та криптону ^{85}Kr в міді, причому розподіл атомів ^{13}N у міді має таку ж саме форму, але більшу довжину профілю. Однак вони характеризуються різним типом твердого розчину – для легких елементів властиві тверді розчини втілення, а для інертних газів – вилучення. Тобто за винятком типу утвореного розчину бомбардування міді іонами нерозчинних згідно діаграм стану [4] легких елементів призводить практично до таких самих результатів, що й обробка у нейтральному середовищі. Можна сказати, що нерозчинні легкі домішки створюють аналогічне нейтральне середовище при горінні в ньому жевріючого розряду.

Розглянемо іншу схему обробки, а саме перерозподіл атомів азоту та вуглецю, присутніх в приповерхневому шарі металу, під дією бомбардування іонами інертних газів у жевріючому розряді.

Що стосується обробки металу, попередньо насиченого азотом (з дисоційованого при підвищених температурах аміаку), в нейтральному середовищі, то при іонному бомбардуванні в середовищі аргону виникають інші закономірності порівняно з обробкою в насичуючому середовищі. Так, обробка в плазмі тліючого розряду заліза, в поверхні якого знаходився азотований шар, отриманий шляхом високотемпературного азотування в середовищі дисоційованого аміаку, призвела до перерозподілу азоту твердого розчину. При цьому глибина проникнення збільшилася в 1,5 рази, а концентрація азоту в твердому розчині на поверхні зменшилася в ~ 3 рази і становить 0,1 ат. %. Також з'явилися помітні виділення нітридів Fe_3N по межах зерен (рис. 3 а), що свідчить про значну міграції азоту з поверхні в глиб металу.

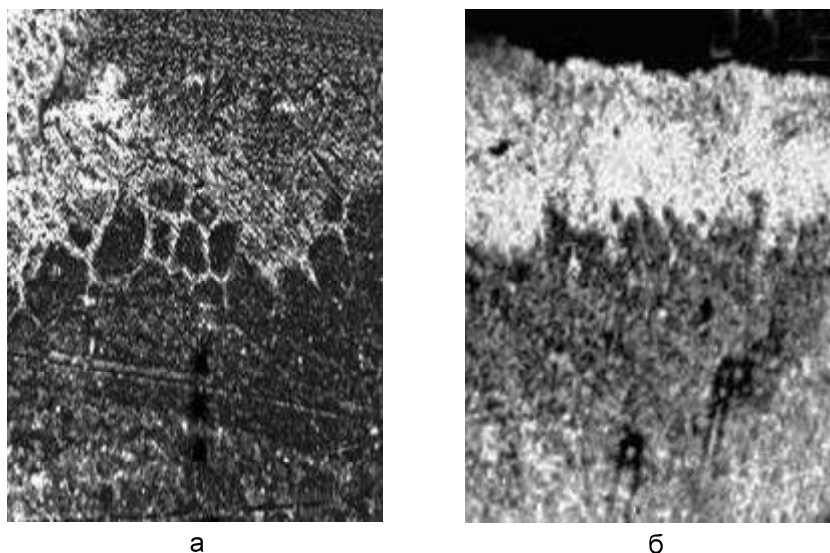


Рис. 3. Перерозподіл азоту, попередньо введеного в метал, під дією бомбардування іонами аргону зразків заліза (а) і нікелю (б), $\times 600$.

Фазові перетворення

Дещо по-іншому відбувається перерозподіл азоту в нікелі. Так, при азотуванні в середовищі дисоційованого аміаку, на поверхні нікелю утворюється азотований шар, що складається переважно з нітридної фази Ni_3N . В результаті іонного бомбардування відбувається її частковий розпад, що супроводжується міграцією атомів азоту в глиб опроміненого матеріалу (рис. 3 б).

Оскільки розчинність азоту в нікелі дуже низька (10^{-4} ат. %), але все ж існує, то дифундуючі атоми азоту виділяються в глибині у вигляді нітридів, про що свідчать рентгенографічні дані, які показали, що їх загальний вміст в зразку до і після обробки було практично одним і тим же - відбувся лише їх перерозподіл. На відміну від заліза, нітрид в дифузійній зоні виділяються по межах зерен в незначних кількостях (рис. 3 б). Все це свідчить про те, що нітрид нікелю Ni_3N більш стабільний при іонному бомбардуванні в жевріючому розряді, ніж при нагріванні, оскільки при 753 К відбувається його дисоціація.

Подальше бомбардування попередньо насиченої азотом міді іонами аргону і криптону привело до нового акту міграції азоту в глиб металу, причому концентраційний профіль, як і раніше, представляв собою експонентну залежність від квадрату глибини проникнення. Нітриди в цьому випадку теж не виникають, а має місце лише пересичений твердий розчин.

Отже залежно від наявності розчинності та її величини змінюється склад дифузійної зони.

Інші закономірності спостерігаються при взаємодії заліза з іонами вуглецю. Перерозподіл атомів вуглецю під дією опромінення іонами інертних газів вивчався на армко залізі і сталях Ст.3, Ст.45 і У8, попередньо підданих цементації в порошкоподібному карбюризаторі $Ca^{14}CO_3$ протягом 1 год при 1273 К. Глибина проникнення атомів аргону в цементовані залізо і сталі при такій обробці не перевищували 30-35 мкм. Інертний газ зосереджується переважно в пухкій ОЦК-фазі ($\alpha-Fe$), а не в компактному цементиті (як у вихідному стані для сталей, так і у стані, що утворюється в залізі і сталях в процесі ізотермічного насичення). Як видно з рис. 4 а, іонне бомбардування призводить до такого перерозподілу атомів вуглецю, що на концентраційних профілях виникають максимуми, які знаходяться на відстані 7-10 мкм від поверхні і простягаються на глибину 23 мкм в залізі і 18-20 мкм в сталях, причому максимальна концентрація вуглецю в сталі в 2 рази вище, ніж у залізі. Мабуть, певний внесок у виникнення концентраційного піку вносять процеси виділення карбіду заліза Fe_3C , безпосередньо в процесі іонного бомбардування. Втім, на поверхні крім твердого розчину також присутні карбіди. Про це свідчать скупчення відновлених мікрокристалів бромистого срібла на межах і всередині зерен, як видно з авторадіограм-реплік (рис. 4 б). Окремі ж мікрокристали відновленого з $AgBr$ срібла вказують на області, де знаходиться твердий розчин вуглецю в залізі. Зазначимо, що зі збільшенням вмісту вуглецю в сталі відбувається невеликий зсув максимуму в бік менших глибин.

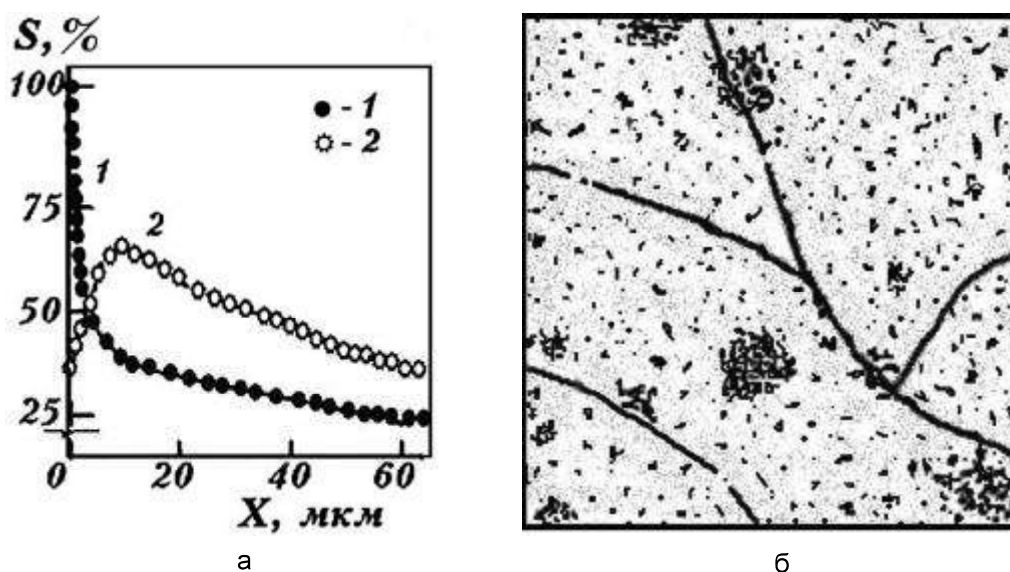


Рис. 4. Розподіл вуглецю ^{14}C в залізі після цементації в твердому карбюризаторі (1) і подальшого бомбардування іонами аргону в плазмі жевріючого розряду (2) (а) і авторадіограма-репліка поверхні, $\times 4800$ (б).

Особливості перерозподілу атомів вуглецю, попередньо введених в мідь, при подальшому бомбардуванні в аргонівій плазмі жевріючого розряду ілюструють криві 1 і 2 на рис. 5. Для введення вуглецю в мідь застосовувалася обробка міді в середовищі метану, міченого ізотопом вуглецю ^{14}C . У міді виникав твердий розчин вуглецю, і максимальна кількість атомів, що припадають на елементарну комірку цього розчину n_a , визначена для приповерхневого шару завтовшки до 15 μm , становить 4,05. Тобто атоми вуглецю розчинилися в міді за типом втілення. Подальше бомбардування іонами аргону або криптону сприяло подальшій міграції атомів вуглецю в глиб міді, що призвело до корінної зміни виду концентраційного профілю, яка супроводжується появою максимуму на набагато більшій, ніж при міграції атомів інертного газу, відстані від поверхні.

Такий хід концентраційного профілю можливо пов'язаний як з висхідною дифузією при дії на атоми вуглецю підвищення температури приповерхневого шару за рахунок нагріву до ~ 500 К при розряді, так і з

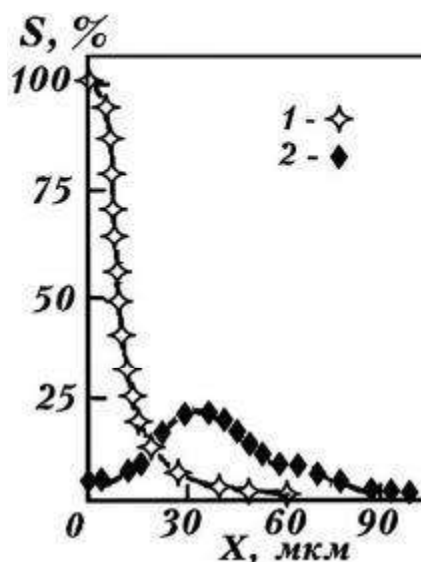


Рис. 5. Концентраційні криві розподілу ^{14}C в міді після насичення в тліючому розряді в середовищі міченого по вуглецю дисоційованого метану CH_4 ($E_p = 1$ кеВ) протягом 1 год (1) і після 1 год обробки іонами Ag з енергією 1 кеВ (2).

Фазові перетворення

виникненням характерного для іонного бомбардування в плазмі жевріючого розряду розподілу радіаційних дефектів [6]. Можна було б припустити, що в дифузійній зоні виникли карбіди міді, однак рентгенографічно і авторадіографічно, а також при використанні мікрорентгеноспектального аналізу вони виявлені не були.

Дійсно, авторадіографічний аналіз із застосуванням р/а ізотопів вуглецю і криптону (рис. 6 а, б) показав, що атоми вуглецю розташовуються рівномірно в кристалічній решітці міді без будь-яких зон переважної локалізації. А атоми інертного газу надходять у вже існуючий твердий розчин вуглецю в міді, а також утворюють газонаповнені пори, що впливає з порівняння авторадіограм, отриманих в β -випромінюванні використаних ізотопів вуглецю і криптону. Аналогічний вигляд мають авторадіограми, отримані при застосуванні радіоактивного ізоотопу аргону. Зазначимо, що в однаково оброблених зразках в одному випадку використовувалися мічені атоми вуглецю і стабільний ізоотоп аргону, у другому – стабільний вуглець і мічені атоми криптону чи аргону.

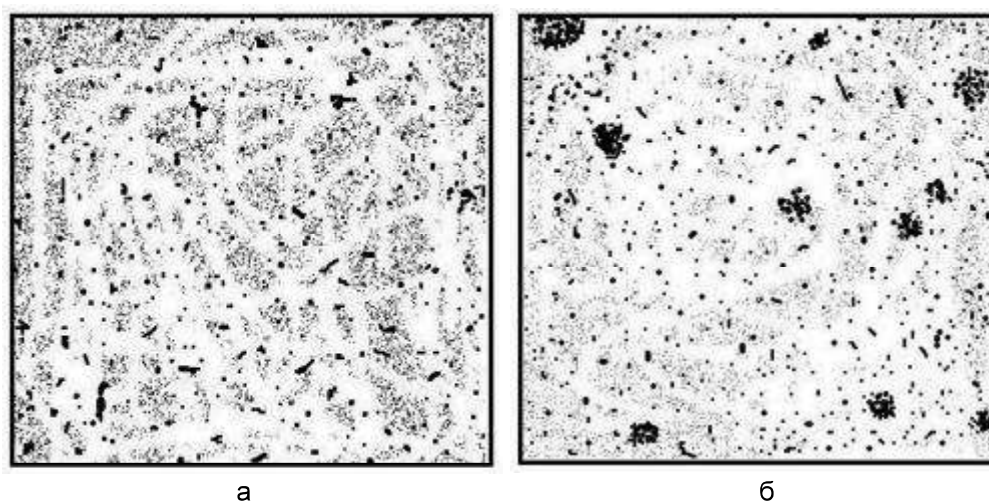


Рис. 6. Розподіл атомів вуглецю ^{14}C (а) і криптону ^{85}Kr (б) після обробки міді, що містить попередньо введений вуглець, в плазмі жевріючого розряду в середовищі інертного газу, $\times 4800$.

Визначення кількості атомів, що припадають на елементарну комірку міді, що містить аргон і вуглець, показало, що значення n_a в цьому випадку зменшується з 4 до 3,9 (при насиченні міді аргоном в аналогічних умовах $n_a = 3,7$). Отже, утворюється складний розчин вилучення, в якому, однак, частина міжвузлів зайнята вуглецем.

Таким чином, показано, що використання насичуючих і нейтральних середовищ, а також їх послідовне застосування для обробки в жевріючому розряді дає можливість створювати задані профілі легування і вводити необхідну кількість легуючої домішки.

Література

1. Алексеевский В.П., Герцрикен Д.С., Ковтун В.И., Тышкевич В.М., Фальченко В.М. Исследование подвижности атомов под воздействием ионной бомбардировки // ЖТФ. – 1981. – 51, вып. 10. – С. 2208– 2210.
2. Герцрикен Д.С., Тышкевич В.М. Тлеющий разряд и инертные газы в металлах. – Киев: Академперіодика, 2006. – 280 с.
3. Штеренберг А.М., Мазанко В.Ф., Герцрикен Д.С. и др. Влияние тлеющих и дуговых разрядов на диффузионные процессы. – М: Машиностроение. Инновационное машиностроение: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. – 379 с.
4. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: в 3 т. / Под общ. ред. акад. РАН Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 991 с. (т. 1.); 1997. – 1023 с. (т. 2.); 2001. – 872 с. (т. 3, кн.1.).
5. Мазанко В.Ф., Герцрикен Д.С., Новомлынец О.А., Миронов Д.В. Распределение инертных газов на поверхности металлов, подвергнутых действию тлеющего разряда. / Инженерія Майбутнього: зб. матеріалів міждисциплін. наук.-практ. конф. – Київ, 2018, С. 22–25.
6. Мазанко В.Ф., Миронов Д.В., Герцрикен Д.С., Луценко Г.В., Бевз В.П. Особенности взаимодействия металлов с нерастворимыми в равновесном состоянии неметаллами в условиях тлеющего разряда // Доповіді НАН України, 2006, № 6, С. 93 – 98.

References

1. Alekseevsky V.P., Gertsriken D.S., Kovtun V.I., Tyshkevich V.M., Falchenko V.M. *Journal of Technical Physics*, 1981, 51, release 10, pp. 2208-2210. [in Russian].
2. Gertsriken D.S., Tyshkevich V.M. *Tleyushchiy razryad i inertnyye gazy v metallakh* (Glow discharge and inert gases in metals), Kyiv: Akademperiodika, 2006, 280 p. [in Russian].
3. Shterenberg A.M., Mazanko V.F., Gertsriken D.S. and other. *Vliyanie tleyushchikh i dugovykh razryadov na diffuzionnyye protsessy* (Influence of glow and arc discharges on diffusion processes), Moscow: Mechanical engineering. Innovative mechanical engineering: Samar.: State tech. un-t, 2018, 379 p. [in Russian].
4. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem: Spravochnik* (Diagrams of the state of double metal systems. Handbook) in 3 volumes: Under total. ed. acad. RAS N.P. Lyakishev, Moscow: Mechanical Engineering, 1996, 991 p. (vol. 1.), 1997, 1023 p. (vol. 2.), 2001, 872 p. (vol. 3, book 1.) [in Russian].
5. Mazanko V.F., Gertsriken D.S., Novomlynets O.A., Mironov D.V., *Engineering the future: Digest materials of interdisciplinary scientific and practical conference*, Kyiv, 2018, pp. 22-25. [in Russian].
6. Mazanko V.F., Mironov D.V., Gertsriken D.S., Lutsenko G.V., Bevez V.P., *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2006, No. 6, pp. 93 - 98. [in Russian].

Одержано 22.02.21

D. S. Gertsriken, V. F. Mazanko, D. V. Mironov, S. Ye. Bogdanov

Formation of introduction solid solutions and phases under the conditions of ion bombardment of metals in the glow discharge

Summary

Regularities of interaction of iron, steels, nickel, copper, titanium with light elements and inert gases in the plasma of the glow discharge studied by methods based on the use of radioactive indicators ^{55}Fe , ^{44}Ti , ^{14}C , ^{13}N , ^{85}Kr , ^{41}Ar (layer-by-layer radiometric analysis of residual integrated activity, macro- and microautoradiography, activation autoradiography), as well as metallography, X-ray analysis and spectral analysis. Processing was carried out according to the diode circuit with parameters of 1 - 55 hours, 0.2 - 2 kV, ~ 500 K. Neutral (argon, krypton) and saturating (nitrogen, ammonia, methane) media were used for processing in the discharge, and further processing of metals previously saturated with nitrogen or carbon was carried out in a neutral medium.

It is established that in the process of introduction into metals (Fe, Ti) under the action of a glow discharge burning in a saturating medium, atoms soluble under equilibrium conditions of elements (N, C), there are interstitial solutions and phases that differ from those formed in isothermal annealing, only the presence of supersaturated solid solutions and some violation of the stoichiometry of carbides and nitrides, as well as a steeper decrease in the concentration of the alloying impurity with increasing distance from the surface. The shape of the concentration profiles outside the layer of the interstitial phase is described by an exponential dependence on the square of the penetration depth. As for the penetration into copper of nitrogen, carbon, argon or krypton atoms, insoluble under equilibrium conditions, in ion bombardment in appropriate media from the treated surface to the end of the diffusion zone there is only a solid solution with a concentration that decreases by the exponent.

It turned out that further treatment of nickel, iron and steel saturated with light elements by argon and krypton ion bombardment leads to redistribution of alloying impurities, separation of interstitial phases mainly at grain boundaries, surface or at some distance from the surface, which contributes to some disturbance of concentration profile. When processing pre-saturated copper interstitial phases do not occur, but the type of profile changes dramatically, but from the maximum to the end of the diffusion zone is described by the exponent.

It is shown that the use of saturating and neutral media, as well as their sequential application for processing in the glow discharge makes it possible to create predetermined doping profiles and enter the required amount of doping impurity.

Keywords: glow discharge, radioactive isotopes, light elements, inert gases, diffusion, formation of phases and solid solutions.