

ORCID: 0000-0002-7549-352X

**В. Ф. Мазанко**

Д.т.н., проф., гол.н.с., відділ фізики транспортних процесів, Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ, Україна,  
[vmazanko@imp.kiev.ua](mailto:vmazanko@imp.kiev.ua)

ORCID: 0000-0002-7493-9761

**Д. С. Герцрікен**

К. ф.-м. н., ст. н. с., відділ фізики транспортних процесів, Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України Київ, Україна,  
[deciatinka@gmail.com](mailto:deciatinka@gmail.com), [dina.s.gertsriken@ukr.net](mailto:dina.s.gertsriken@ukr.net)

ORCID: 0000-0002-0774-434X

**О. О. Новомлинець**

Д.т.н., доцент, перший проректор Чернігівського національного технологічного університету, Чернігів, Україна  
[oon1@ukr.net](mailto:oon1@ukr.net)

ORCID: 0000-0002-8679-351X

**В. М. Міронов**

Д. ф.-м. н., проф., кафедра «Фізика, математика та інформаційні технології» Самарський державний аграрний університет, Самара  
[alexstown007@gmail.com](mailto:alexstown007@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-9947-5166

**Д. В. Міронов**

К. ф.-м. н., доцент, зав. кафедри «Фізика, математика та інформаційні технології» Самарський державний аграрний університет, Самара  
[alexstown007@gmail.com](mailto:alexstown007@gmail.com)

УДК 537.525:546.29:532.72

PACS: 66.30.Dn, 61.72.Bb

DOI: 10.31651/2076-5851-2019-1-40-50

**ДИФУЗИЯ У ЗАЛІЗІ ТА ЙОГО СПЛАВАХ ПІСЛЯ НАСИЧЕННЯ  
ПОВЕРХНІ ІОНАМИ АРГОНУ ТА КРИПТОНУ ПРИ ВІДПАЛАХ ТА  
ІМПУЛЬСНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

*За допомогою методу радіоактивних індикаторів вивчений вплив попереднього введення інертних газів у метали у плазмі жевріючого розряду на дифузію (масоперенесення) при різних зовнішніх впливах. Показано, що наявність попередньо введеного інертного газу в залізо та сплави на його основі призводить до зменшення рухливості атомів при ізотермічних відпалах, низькотемпературному імпульсному навантаженні в широкому інтервалі швидкостей деформації та подальшому іонному бомбардуванні у жевріючому розряді. Бар'єрна дія введеного газу пов'язується із структурно-фазовими змінами у приповерхневих шарах.*

**Ключові слова:** дифузія, рухливість атомів, інертні гази, жевріючий розряд, імпульсні навантаження.

## 1. Вступ

Відомо, що введення інертних газів у метали шляхом обробки у газових розрядах – цілеспрямоване або за експлуатаційних умов – змінює властивості металу на поверхні та протягом всієї дифузійної зони, яка може досягати макроскопічних значень [1-4]. Воно супроводжується появою у приповерхневому шарі нерівноважної структури, яка характеризується виникненням твердого розчину метал-інертний газ, різних радіаційних дефектів та наповнених газом мікробульбашок [1]. Все це впливає на стабільність матеріалів під час подальшої експлуатації, особливо при дії підвищених та високих температур, знакозмінних напружень, імпульсних пластичних деформацій тощо [1, 3]. Крім того попередні дослідження показали, що дефектна структура шару та наявність атомів інертного газу може спричинювати бар'єрний вплив на дифузійне проникнення легуючих атомів при наступній імпульсній хіміко-термічній обробці [4, 5].

### Постановка проблеми

Оскільки твердий розчин, який виникає в металі в процесі обробки у плазмі жевріючого розряду, є метастабільним і утворюється за типом вилучення [1], дифузія в ньому повинна характеризуватися дещо іншими закономірностями, ніж у чистому металі або твердому розчині, який отриманий за рівноважних умов. Отже знаючи зміни у швидкості переносу речовини при попередньому насиченні поверхні та при поверхневих шарів металу інертним газом чи за рахунок перерозподілу введених атомів інертних газів за умов різних зовнішніх впливів, можна певним чином прогнозувати подальшу поведінку конструкційних матеріалів, які містять аргон, криптон тощо.

### Мета

З огляду на все вищевикладене видається перспективним дослідження впливу іонного бомбардування в нейтральному середовищі (аргон, криптон) на такий структурно-чутливий процес, як подальша дифузія у насиченому інертним газом металі.

## 2. Матеріали та методика

Експерименті проводили на залізі армко, сталі У8 та сплаві заліза з 30% нікелю, з яких виготовляли циліндричні зразки. На частину зразків у вихідному стану наносили гальванічні покриття з заліза чи нікелю товщиною до 1 мкм. Для нанесення нікелю при кімнатній температурі застосовували нікелевий анод і електроліт, який складався з 95% сірчаноокислого нікелю  $\text{NiSO}_4$ , 5% хлористого натрію  $\text{NaCl}$  та кілька крапель водного розчину  $\text{NiSO}_4$ , міченого по нікелю  $^{63}\text{Ni}$ , для досягнення необхідного значення  $\text{pH} = 5,5$ , у електроліт додавали незначну кількість лимонної кислоти  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ . Для нанесення заліза застосовували платиновий анод та електроліт, що складався з хлорного заліза  $\text{FeCl}_3$  з кількома краплями  $\text{FeCl}_3$ , міченого по залізу  $^{55}\text{Fe}$ , та соляної кислота у кількості, необхідній для отримання  $\text{pH} = 6$ . Рівномірність покриттів контролювали шляхом авторадіографування покритих поверхонь. При цьому різниця у значеннях ступеня почорніння фотошару у різних точках поверхні не перевищувала 5%. Нанесення гальванічних покриттів на метали після насичення інертним газом провадилося за тими же режимами. Для одночасної обробки зразки були розташовані на сталій оправці (катоді) симетрично відносно анода. Насичення проводили за тріодною схемою [1, 6]. Крім того для порівняння були проведені досліди за тією же схемою на алюмінії та міді, які попередньо оброблювали у суміші аргону і радіоактивного криптону.

Другу частину зразків піддали цементації у середовищі порошкоподібного карбюратора  $\text{Ba}^{14}\text{CO}_3$ .

Третю частину зразків використовували для введення аргону чи криптону з метою створення метастабільного розчину метал-інертний газ для вивчення проникнення аргону та криптону у вже існуючий розчин. Режими обробки були аналогічними тим, що використовувались при попередньому насиченні інертними газами.

Характеристики застосованих радіоактивних ізотопів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики використаних у роботі р/а ізотопів

Table 1

Characteristics of r/a isotopes used in the work

Ізотоп	Тип розпаду	Період напіврозпаду	Енергія $\beta$ -часток, $\gamma$ -квантів та характеристичного рентгенівського випромінювання, кеВ
$^{14}\text{C}$	$\beta^-$	5 000 років	150 ( $\beta$ )
$^{41}\text{Ar}$	$\beta^-, \gamma$	110 хвилин	2500 ( $\beta$ ), 1500 ( $\gamma$ )
$^{55}\text{Fe}$	$\epsilon$	3 роки	52 (X-rays)
$^{63}\text{Ni}$	$\beta^-$	125 років	65 ( $\beta$ )
$^{85}\text{Kr}$	$\beta^-, \gamma$	10 років	680 ( $\beta$ ), 517 ( $\gamma$ )

Іонне бомбардування торцевих поверхонь зразків проводили при тиску  $\sim 1,3 \cdot 10^3$  Па в середовищі аргону, криптону та суміші стабільного аргону з радіоактивним ізотопом криптону (біля 0,1 % радіоактивного ізотопу  $^{85}\text{Kr}$ ) у плазмі жевріючого розряду.

Напруга між анодом та катодом становила 1 кВ, щільність струму 50 мА/см<sup>2</sup>. Температура поверхні зразків не перевищувала 473-493 К. Тривалість обробки становила 30 год. Внаслідок такої обробки у приповерхневий шар товщиною 30 – 35 мкм було введено до 2 – 3 % інертного газу, розподіленого у дифузійній зоні за експоненційною залежністю від квадрату відстані від поверхні металу [7]. Це призвело до утворення в приповерхневому шару твердого розчину вилучення аргону та криптону, але з віддаленням від поверхні, приблизно після 20% глибини проникнення, він перетворюється на твердий розчин заміщення. Однак це не впливає на експоненційну залежність коефіцієнта дифузії від глибини. Тобто у координатах  $\lg D - X^2$  має місце пряма лінія, тому це можна вважати проявом об'ємної дифузії. Розподіл інертного газу на поверхні характеризується наявністю концентрично розташованих зовнішньої та внутрішньої областей (рис. 1 а). До речі, саме внутрішня область містить практично весь введений газ [1, 4, 8].

Насичені зразки були піддані зовнішнім впливам: ізотермічний відпал при температурах 973 ÷ 1173 К протягом 1 ÷ 120 год., ударне стиснення із швидкостями  $10^{-1} - 10^4$  с<sup>-1</sup> в інтервалі 293 ÷ 673 К, яке здійснювалось різноманітними способами (ультразвукова ударна обробка, падіння вантажу різної ваги з різної висоти, магнітно-імпульсне стиснення, вибух тощо), мартенситні перетворення за вибуховою кінетикою при низьких та криогенних температурах, іонне бомбардування у плазмі жевріючого розряду.

### 3. Результати досліджень

Після введення в залізо та його сплави стабільних ізотопів аргону чи криптону на частину зразків наносили тонкі шари (до 0,1 – 1 мкм) радіоактивних заліза та нікелю. Покриття здійснювали, як для зрізків у вихідному стані, електролітичним способом із водних розчинів  $^{55}\text{FeCl}_3$  та  $^{63}\text{NiSO}_4$ . Вже під час електролітичного нанесення металічних покриттів, що містять р/а ізотопи, виявилися особливості, які характеризують процес осадження шарів металів на метал, попередньо насичений інертним газом. В першу чергу це проявляється у виникненні неоднорідного розподілу осадженого ізотопу на поверхні обробленого зразку, який залежить від ступеню розпилення та від вмісту аргону чи криптону у будь-якому місті на поверхні (рис. 1 б), в той час як відмінності у концентрації р/а ізотопів заліза або нікелю на поверхні вихідного армо заліза чи сплавів на його основі не перевищували 3 %. Крім того, для одержання необхідної активності шару при нанесенні на метал з аргонем порівняно з чистим металом були потрібні значно більш високі густини струму при створенні гальванічного покриття. Слід зауважити, що такі ж саме особливості мають місце також для гетеродифузії нікеля у залізо (рис. 1 в). Крім того не має значення, аргонем чи криптоном були попереднього насичені зразки та яка кількість газу була введена у межах від 1 до 3%. Також не був помітним вплив на розподіл по поверхні кількості газонаповнених пор та твердого розчину.

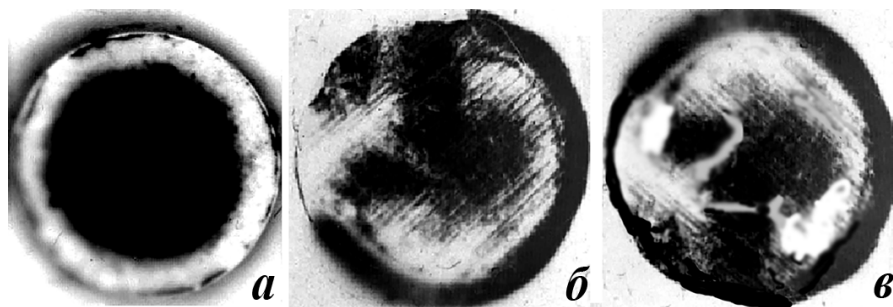


Рис. 1. Макроавторадіограми поверхні заліза, яке містить інертний газ, до (а) та після (б) електролітичного нанесення покриття, и распределение на поверхности никеля после его проникновения в железо, содержащее аргон, при последующем отжиге (в): а –  $^{85}\text{Kr}$ , б –  $^{55}\text{Fe}$ , в –  $^{63}\text{Ni}$

Fig. 1. Macroautoradiograms of the iron surface containing inert gas before (a) and after (b) electrolytic coating, and distribution on the nikel surface after its penetration into the iron containing argon, with subsequent annealing (c): а –  $^{85}\text{Kr}$ , б –  $^{55}\text{Fe}$ , с –  $^{63}\text{Ni}$

Проведені експерименти показали, що дифузія заліза в твердому розчині вилучення Fe - Ar відбувається на менші глибини і з меншою швидкістю, ніж у вихідне армо залізо (табл. 2), хоча відомо, що надлишкові структурні вакансії, присутні в твердому розчині вилучення, сприяють зростанню коефіцієнтів дифузії і самодифузії, як це показано, наприклад, на системі Fe - Al [9].

Таблиця 2

Глибини проникнення ( $X$ , мкм) і коефіцієнти дифузії ( $D_{\text{ef}}$ ,  $\text{cm}^2/\text{c}^*$ ) заліза  $^{55}\text{Fe}$  у залізі та твердому розчині аргону аргону у залізі за ізотермічних відпалів.

Table 2

Depths of penetration ( $X$ ,  $\mu\text{m}$ ) and diffusion coefficients ( $D_{\text{ef}}$ ,  $\text{cm}^2/\text{s}^*$ ) of iron  $^{55}\text{Fe}$  in iron and argon solid solution in iron by isothermal annealing

$T, K$	Залізо		Залізо – аргон	
	$X$	$D_{ef}$	$X$	$D_{ef}$
973	90	$9,5 \cdot 10^{-13}$	30	$3,3 \cdot 10^{-13}$
1073	115	$7,0 \cdot 10^{-12}$	45	$3,0 \cdot 10^{-12}$
1173	150	$4,2 \cdot 10^{-11}$	60	$1,5 \cdot 10^{-11}$

\*Використовується ефективний коефіцієнт об'ємної дифузії, оскільки є деякий внесок у потік речовини дифузії по структурним дефектам

Дещо інша картина спостерігається в разі дифузії вуглецю. Глибина проникнення атомів радіоактивного вуглецю  $^{14}C$  в залізо і сталь, що містять атоми аргону, збільшується більш, ніж на порядок в порівнянні з глибиною проникнення атомів заліза в цей матеріал. Наявність інертного газу в кристалічній решітці заліза проявляється тільки на глибинах до 200 мкм, де концентрація атомів вуглецю в Fe - Ar нижче, ніж в Fe. Тобто не тільки атоми аргону, розташовані в приповерхневому шарі товщиною  $\sim 30$  мкм, а й наявні на великих глибинах радіаційні пошкодження кристалічної решітки змінюють проникність заліза і сталі. Однак в цілому глибини проникнення атомів  $^{14}C$  в твердому розчині залізо-аргон і чистому залізі практично збігаються (рис. 2).

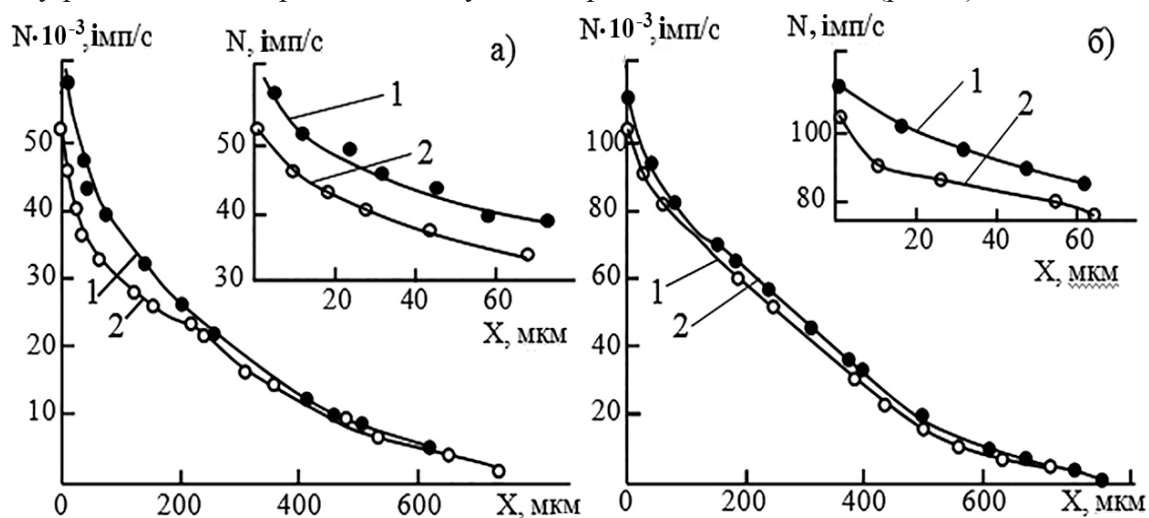


Рис. 2. Концентраційні профілі розподілу атомів  $^{14}C$  і їх початкові ділянки в залізі (1) і твердому розчині аргону в залізі (2) при відпалі протягом 1 год. при 1073 К: а – залізо, б – сталь У8.

Fig. 2. Concentration profiles of the distribution of  $^{14}C$  atoms and their initial sites in iron (1) and argon solid solution in iron (2) on annealing for 1 h. at 1073 K: a - iron, b - steel U8.

При переході від стаціонарного термічного впливу на досліджуваний метал до імпульсного деформування під час відсутності нагріву також спостерігається вплив інертного газу на дифузію. Для швидкостей пластичної деформації в інтервалі від 0,1 до  $10^4 \text{ c}^{-1}$ , як і для різних температур відпалу, присутність в металі атомів інертного газу призводить до зменшення глибини проникнення і швидкості міграції атомів в твердому розчині в порівнянні з чистим металом (табл. 3, рис. 3). Однак слід зазначити, що з порівняння результатів, представлених в табл. 2 і 3, випливає, що при міграції атомів в металі, що містить інертні гази, температура надає більш слабкий вплив на дифузію, ніж швидкість пластичної деформації. Крім того, на відміну від температури пластична

деформація з ростом величини  $\dot{\epsilon}$  призводить до зменшення відмінностей в значеннях коефіцієнта масоперенесення заліза в залізі і твердому розчині інертного газу в металі  $D_{M(Fe-Ar)}^{Fe}$ . Для ізотермічного відпалу незалежно від температури ця різниця не перевищує  $\sim 2,5 - 3$  разів, тоді як з ростом швидкості деформації від  $0,1$  до  $10^4 \text{ c}^{-1}$  відношення  $D_{M(Fe)}^{Fe} / D_{M(Fe-Ar)}^{Fe}$  зменшується від  $10$  до  $1,5$ .

Таблиця 3

Вплив швидкості пластичної деформації на проникнення атомів  $^{55}\text{Fe}$  і  $^{85}\text{Kr}$  у залізо і твердий розчин аргону у залізі при  $300 \text{ K}$  ( $D_M, \text{cm}^2/\text{c}^*$ ).

Table 3

Influence of plastic deformation rate on the penetration of  $^{55}\text{Fe}$  and  $^{85}\text{Kr}$  atoms into iron and argon solid in iron at  $300 \text{ K}$  ( $M, \text{cm}^2/\text{s}^*$ ).

$\dot{\epsilon}, \text{c}^{-1}$	Залізо		Залізо – аргон	
	$^{55}\text{Fe}$	$^{85}\text{Kr}$	$^{55}\text{Fe}$	$^{85}\text{Kr}$
0,2	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$3,1 \cdot 10^{-10}$	$2,0 \cdot 10^{-9}$	-
50	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$
400	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$
3000	15,5	3,5	10,0	2,0
$10^7$	28	7,5	20	6,6

\*Використовується коефіцієнт масоперенесення, який, згідно з [10, 11], можна вважати рівним коефіцієнтові об'ємної дифузії.

Для міграції атомів в металах за імпульсної обробці характерний, як правило, рівномірний розподіл за об'ємом зерна [10,11]. Для з'ясування впливу наявності в матеріалі інертного газу на характер проникнення атомів досліджувалася міграція атомів нікелю в залізі. Так, перерозподіл атомів  $^{63}\text{Ni}$  в насиченому аргоні залізі при багаторазовому деформуванні з ультразвуковою частотою ( $0,2 \text{ c}^{-1}$ ,  $30 \text{ кГц}$ ) в інтервалі температур  $305 - 673 \text{ K}$  протягом  $1 \text{ c}$  відбувається також за об'ємом зерен, що підтверджується даними авторадіографічного аналізу (рис. 4 а). Як видно з рисунка, на глибині  $\sim 10 \text{ мкм}$  в площині, паралельній поверхні зразка, спостерігається переважне почорніння в об'ємі зерна, в той час як на границях ступінь почорніння істотно нижче. Причому при деформації в умовах кімнатної температури зменшення концентрації нікелю в границях порівняно з об'ємом зерна виражено менш помітно. Ці відмінності можливо пов'язані з ростом існуючих в насиченому інертним газом металі газонаповнених пір (особливо в границях зерен), що перешкоджають міграції атомів нікелю.

Крім того підвищена концентрація точкових дефектів, переважно вакансій, що виникають, як відомо, в процесі ультразвукової ударної обробки, також може впливати на міграцію атомів при підвищених температурах. Подібним чином мігрують атоми радіоактивного нікелю  $^{63}\text{Ni}$  в залізнікелевого сплаві ( $\text{Fe} - 30\% \text{ Ni}$ , фаза), в приповерхневому шарі якого перебувало до  $\sim 2\%$  аргону, в процесі імпульсного деформування ударом зі швидкістю  $20 \text{ c}^{-1}$ .

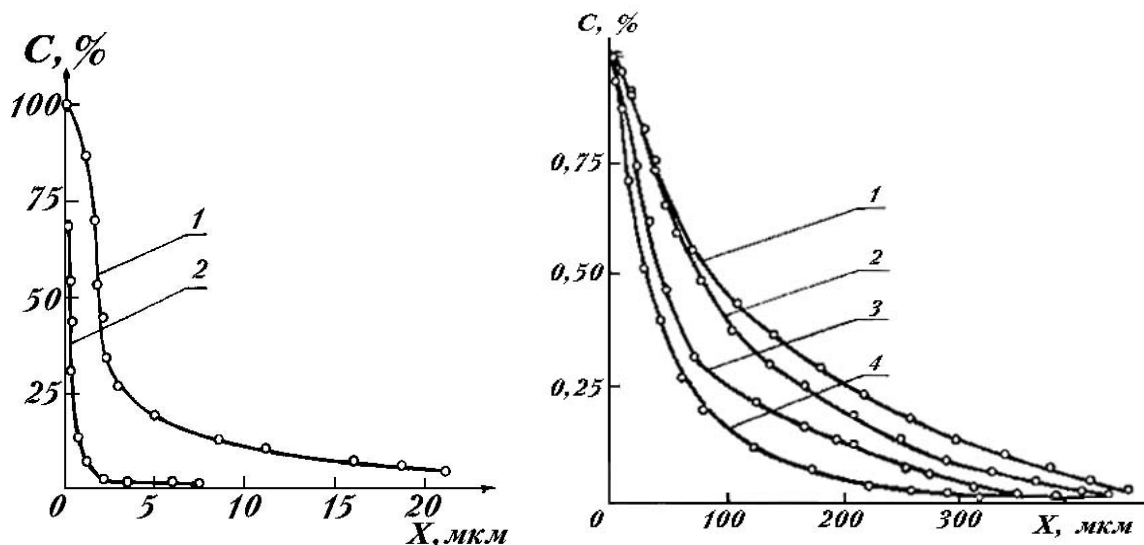


Рис. 3. Концентраційні профілі розподілу атомів  $^{55}\text{Fe}$  і  $^{85}\text{Kr}$  в залізі та твердому розчині аргону в залізі при імпульсному навантаженні:  
 а – 1 -  $^{55}\text{Fe}$  у Fe, 2-  $^{55}\text{Fe}$  у Fe - Ar (50 с-1, 293 К);  
 б – 1 -  $^{55}\text{Fe}$  у Fe, 2 -  $^{55}\text{Fe}$  у Fe - Ar, 3 -  $^{85}\text{Kr}$  у Fe, 4 -  $^{85}\text{Kr}$  у Fe – Ar (3.103 с-1, 323 К).  
 Fig. 3. Concentration profiles of the distribution  $^{55}\text{Fe}$  and  $^{85}\text{Kr}$  atoms in iron and argon solid solution in iron under pulsed loading:  
 а - 1 -  $^{55}\text{Fe}$  in Fe, 2-  $^{55}\text{Fe}$  in Fe - Ar (50 s-1, 293 K); б - 1 -  $^{55}\text{Fe}$  in Fe, 2 -  $^{55}\text{Fe}$  in Fe - Ar, 3 -  $^{85}\text{Kr}$  in Fe, 4 -  $^{85}\text{Kr}$  in Fe - Ar (3.103 s-1, 323 K).

З приповерхневого шару протяжністю близько 0,5 мкм атоми нікелю проникають на глибину до 30 мкм. Причому навіть при збільшенні швидкості деформації на два порядки, проникнення відбувається також за об'ємним механізмом, про що свідчить локалізація атомів  $^{63}\text{Ni}$  всередині аустенітних зерен (рис. 4 б), в той час як їх міграція, стимульована тільки іонної обробкою, має чітко виражений зернограничний характер [8]. При цьому швидкість дифузії нікелю в сплав, який містить інертний газ, майже в 5 разів нижче, ніж це має місце при проникненні в сплав, який не містить аргон, і становить  $5,2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ .

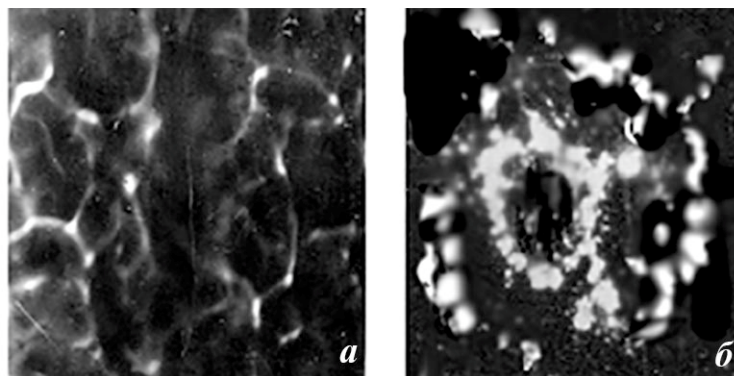


Рис. 4. Мікроавторадіограми заліза (а) і сплаву Fe-Ni (б), які містять аргон, після проникнення атомів  $^{63}\text{Ni}$  ( $T = 473 \text{ K}$ ),  $\times 300$ .

Fig. 4. Microautoradiograms of iron (a) and argon-containing Fe-Ni (b) alloy after penetration of  $^{63}\text{Ni}$  atoms ( $T = 473 \text{ K}$ ),  $\times 300$ .

Дослідження масоперенесення (дифузії) криптону  $^{85}\text{Kr}$  у гомогенних сплавах Fe+30%Ni та Fe+33%Ni у вихідному стані та після насичення у жевріючому розряді

аргоном (~ 1 %) за умов мартенситних перетворень (початок мартенситного перетворення  $M_n$  становить відповідно 233 та 93 K) показало, що при такій схемі імпульсного навантаження наявність інертного газу також зменшує рухливість атомів (табл. 4). Крім того має місце десорбція значної частини аргону із сплавів під час перетворення навіть при таких низьких температурах. Слід також зауважити, що більш висока рухливість при 93 K порівняно з 233 K не є помилкою, оскільки зростання коефіцієнта масоперенесення при зменшенні температури імпульсного навантаження нижче деякого порогового значення ( $100 \text{ K} < T < 130 \text{ K}$ ) було експериментально доведено авторами роботи [12].

Таблиця 4

Table 4

Сплав	Fe +30 % Ni	Fe +30 % Ni+1 %Ar	Fe +33 % Ni	Fe +33 % Ni+1 %Ar
Ізотоп	$D_{ef} \cdot 10^{10}, \text{cm}^2/\text{c}$		$D_{ef} \cdot 10^8, \text{cm}^2/\text{c}$	
$^{55}\text{Fe}$	15	0,23	210	3,4
$^{85}\text{Kr}$	0,93	0,065	1,3	0,0025

Відмінності у проникненні криптоноу під дією іонного бомбардування у плазмі жевріючого розряду у залізо та його сплаві і в ці ж матеріали після попереднього насичення аргоном протягом двох діб ілюструються даними табл. 5. Коефіцієнти дифузії зменшуються в 4 – 5 разів. Слід однак зауважити, що таке значне уповільнення дифузії атомів криптоноу у насиченому металі чи сплаві частково пов'язане з розпиленням поверхні, яке є тим сильнішим, чим більша кількість введеного газу, оскільки наявність газонаповнених пор та твердого розчину метал-інертний газ робить при поверхневий шар більш пухким. І тому розпилення зростає, що зменшує величину концентраційного профілю проникнення криптоноу. Крім того на поверхні завжди має місце десорбція газу.

Таблиця 5

Вплив наявності інертного газу в приповерховому шарі на коефіцієнт дифузії криптоноу  $^{41}\text{Ar}$  при подальшій обробці у плазмі жевріючого розряду (~ 500 K)

Table 5

Influence of the inert gas in the surface layer on diffusion coefficient of krypton  $^{41}\text{Ar}$  during further treatment in the glow discharge plasma (~ 500 K)

Матеріал	Fe	$\alpha$ -(Fe-Ni)	$\gamma$ -(Fe-Ni)	$(\alpha + \gamma)$ -(Fe-Ni)	
Вихідний стан	$D_{ef} \cdot 10^{14}, \text{cm}^2/\text{c}$	5,1	30	14	45
Після насичення		1,2	5,5	3,1	11

Експерименти, проведені на алюмінії та міді, показали, що проникнення атомів криптоноу при 6 год. обробки характеризується значеннями коефіцієнтів дифузії  $9,7 \cdot 10^{-11}$  та  $2,5 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{c}$  відповідно. Обробка після попереднього насичення самим аргоном протягом 1 год. призвела до зменшення рухливості атомів криптоноу під час наступного бомбардування у суміші газів. Так значення коефіцієнтів дифузії знизились до  $3,3 \cdot 10^{-11}$  та  $8,1 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{c}$  відповідно. Отже цей ефект має також місце на різних металах.

#### 4. Висновки

Таким чином, бомбардування металів іонами інертних газів створює бар'єрний ефект в приповерховому шарі, що призводить до зменшення його дифузійної проникності як в умовах стаціонарних ізотермічних відпалів, так і імпульсних впливів. Така дія наявності газу можливо спричинена виникненням пересичених твердих розчинів, газонаповнених пор, різних структурних дефектів.



**Список використаної літератури:**

1. Герцрикен Д. С. Тлеющий разряд и инертные газы в металлах / Д. С. Герцрикен, В. М. Тышкевич. – Киев: Академперіодика, 2007. – 272 с. – Режим доступу: ISBN 966-02-2320-X
2. Мазанко В. Ф. Диффузионные процессы в металлах под действием магнитных полей и импульсных деформаций, том 2 / В. Ф. Мазанко, А. В. Покоев, В. М. Миронов, Д. С. Герцрикен, Д. В. Миронов, Г. В. Луценко. – М.: Машиностроение, 2006. – 310 с. – Режим доступу: <https://www.twirpx.com/file/1083881/>
3. Штеренберг А. М. Влияние тлеющих и дуговых разрядов на диффузионные процессы / А. М. Штеренберг, В. Ф. Мазанко, Д. С. Герцрикен, В. М. Миронов, Д. В. Миронов, С. А. Бобырь. – М. Инновационное машиностроение, 2018. – 379 с
4. Мазанко В. Ф. Влияние тлеющего разряда на распределение инертных газов на поверхности металлов / В. Ф. Мазанко, Д. С. Герцрикен, О. А. Новомлынец, Д. В. Миронов, В. М. Миронов // 13-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом». Минск: – 30 сентября - 3 октября 2019.
5. Мазанко В. Ф. Влияние бомбардировки ионами аргона в плазме тлеющего разряда на диффузионную проницаемость железа и его сплавов В. Ф. Мазанко, В. М. Миронов, А. Н. Безуглый, С. А. Бобырь. // Труды XII Межд. Совещ. «Радиационная физика твёрдого тела», Севастополь: 1-6 июня 2002 г. М.: НИИ ПМТ. – С. 220-224.
6. Бобырь С. А. Особенности взаимодействия металлов с инертными газами в плазме тлеющего разряда / С. А. Бобырь, Д. С. Герцрикен, В. М. Миронов, В. М. Тышкевич // Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИГТ-2001). Минск: БелГУ. – 2001. – С. 60-63. – Режим доступу: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/203874>
7. Тышкевич В. М. Влияние условий обработки и характеристик материалов на их взаимодействие с инертными газами в плазме тлеющего разряда / В. М. Тышкевич, Д. С. Герцрикен // Металлофизика и новейшие технологии. – 2001. – Т. 23, № 1. – С. 51 – 69.
8. Герцрикен Д. С. Особливості перерозподілу атомів поверхневих шарів при іонному бомбардуванні. / Д. С. Герцрикен, В. М. Тышкевич, В. М. Черніков. // *Доп. НАНУ*. – 1996. – № 12. – С. 113-116.
9. Герцрикен С. Д. Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе. / С. Д. Герцрикен, И. Я. Дехтяр. – М.: Физматгиз, 1960. – 564 с.
10. Герцрикен Д. С. Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий / Д. С. Герцрикен, В. Ф. Мазанко, В. М. Тышкевич, В. М. Фальченко. – Киев: НАНУ, 1999. – 436 с.
11. Миронов В. М. Массоперенос и фазообразование в металлах при импульсных воздействиях / В. М. Миронов, В. Ф. Мазанко, Д. С. Герцрикен, А. В. Филатов. – Самара: Самарский университет, 2001. – 230 с.
12. Mazanko V. M. Temperature effect on diffusion processes in metals at different impulse treatments / V. M. Mazanko, Yu. N. Koval, Yu. Ya. Meshkov, V. M. Mironov, V. V. Alekseeva // Вісник Черкаського університету. Серія «Фізико-математичні науки». – 2007. – Т. 117. – С. 40 – 46. – Режим доступу: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15530214>

**References:**

1. Gertsriken D. S., Tyshkevich V. M. (2007) *Glow discharge and inert gases in metals*. Kyiv: Akadempriodika (in Russ.) Retrieved from ISBN 966-02-2320-X
2. Mazanko V. F., Pokoyev A. V., Mironov V. M., Gertsriken D. S., Mironov D. V., Lutsenko G. V. (2006) *Diffusion processes in metals under the influence of magnetic fields and pulsed strains, volume 2*. M.: Mashinostroyeniye (in Russ.) Retrieved from <https://www.twirpx.com/file/1083881/>

3. Shterenberg A. M., Mazanko V. F., Gertsriken D.S., Mironov V.M., Mironov D. V., Bobyr' S. A. (2018) *The effect of glow and arc discharges on diffusion processes*. M.: Innovatsionnoye mashinostroyeniye (in Russ.)
4. Mazanko V. F., Gertsriken D. S., Novomlynets O. A., Mironov D. V., Mironov V. M. (2019) Influence of glow discharge on the distribution of inert gases on metals surface. *13-ia Mezhdunarodnaia konferentsiia Vzaimodeistvie izlucheni s tverdym telom*. Minsk (in Russ.)
5. Mazanko V.F., Mironov V. M., Bezuglyi A. N., Bobyr S. A. (2002) Influence of bombardment by argon ions in a glow discharge plasma on diffusion permeability of iron and its alloys. *Trudy KHII Mezhd Soveshch Radiatsionnaia fizika tverdogo tela, Sevastopol*. M. (in Russ).
6. Bobyr' S. A., Gertsriken D. S., Mironov V. M., Tyshkevich V. M. (2001). Features of the interaction of metals with inert gases in a glow discharge plasma. *Vzaimodeystviye izlucheni s tverdym telom (VITT-2001)*. Minsk: BelGU (*The interaction of radiation with a solid (WITT-2001)*). Minsk: BelSU), 60-63 (in Russ.) Retrieved from <http://elib.bsu.by/handle/123456789/203874>
7. Tyshkevich V. M., Gertsriken D. S. (2001) Influence of processing conditions and characteristics of materials on their interaction with inert gases in a glow discharge plasma. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 23(1), 51-69 (in Russ.)
8. Gertsriken D. S., Tishkevich V. M., Chernikov V. M. (1996) Features of the re-atomization of the surface balls at the ion bombardment. *Dop. NANU*, 12, 113-116. (in Russ.)
9. Gertsriken S. D., Dekhtyar I. Y. (1960) *Solid phase diffusion in metals and alloys*. M.: Fizmatgiz (in Russ.)
10. Gertsriken D. S., Mazanko V. F., Tishkevich V. M., Falchenko V. M. (1999) *Mass transfer in metals at low temperatures under external influences*. Kyiv: NANU (in Russ.)
11. Mironov V. M., Mazanko V. F., Gertsriken D. S., Filatov A. V. (2001) *Mass transfer and phase formation in metals under pulsed effects*. Samara: Samarskiy universitet (in Russ.)
12. Gertsriken D. S., Mazanko V. M., Koval Y. N., Meshkov Y., Mironov V. M., Alekseeva V. V., Mironova T. V. (2007) Temperature effect on diffusion processes in metals at different impulse treatments. *Visnyk Cherkaskoho Universytetu. Seriia «Fizyko-Matematychni Nauky» (Bulletin of Cherkasy University. Series "Physics and Mathematics")*, (117), 40-46. Retrieved from <https://elibrary.ru/item.asp?id=15530214>

#### **V. F. Mazanko**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Research Fellow. Department of Transport Process Physics. G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the N.A.S. of Ukraine, Kyiv, Ukraine,  
[vmazanko@imp.kiev.ua](mailto:vmazanko@imp.kiev.ua)

#### **D. S. Gertsriken**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Department of Transport Process Physics, Senior Research Fellow. G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the N.A.S. of Ukraine, Kyiv, Ukraine,  
[deciatinka@gmail.com](mailto:deciatinka@gmail.com) , [dina.s.gertsriken@ukr.net](mailto:dina.s.gertsriken@ukr.net)

#### **O. A. Novomlynets**

First Vice-Rector, Doctor of Technical Sciences, Professor. Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine,  
[oon1@ukr.net](mailto:oon1@ukr.net)

**D. V. Mironov**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head  
Department of Physics, Mathematics and Information Technology, Samara State Agrarian  
University, 446442, Samara Region, Kinel, smt. Ust-Kinelsky, ul. 8A Sportivnaya.  
[alexstov007@gmail.com](mailto:alexstov007@gmail.com)

**V. M. Mironov**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Physics,  
Mathematics and Information Technology, Samara State Agrarian University,  
Samara Region, Kinel  
[alexstov007@gmail.com](mailto:alexstov007@gmail.com)

**DIFFUSION IN IRON AND ITS ALLOYS AFTER SATURATION OF THE  
SURFACE WITH ARGON AND KRYPTON IONS DURING ANNEALING AND  
PULSED LOADING**

**Summary.** *The effect of the preliminary introduction of inert gases (argon and krypton) into iron and its alloys in a glow discharge plasma on diffusion (mass transfer) under various external influences was studied using methods based on the use of radioactive isotopes and x-rays. The studies were carried out by methods of x-ray diffraction analysis, layered radiometric analysis of residual integral activity, macro-, micro-, electron-microscopic and activation autoradiography. Isotopes of iron  $^{55}\text{Fe}$ , nickel  $^{63}\text{Ni}$ , carbon  $^{14}\text{C}$ , argon  $^{41}\text{Ar}$  and krypton  $^{85}\text{Kr}$  were used. The following external effects were applied to the metal (alloy) in the initial state and after saturation with an inert gas: galvanic coating, isothermal annealing, athermal martensitic transformation with explosive kinetics and a large volume effect (~ 3%), ultrasonic impact treatment, compression due to deformation when the load falls, magnetic pulse deformation, etc. It is shown that the presence of a pre-introduced inert in iron and alloys based on it leads to a decrease in the mobility of atoms during annealing, low-temperature pulsed loading in a wide range of deformation rates, and further ion bombardment in a glow discharge. No difference was found in the effect of the type of inert gas — argon or krypton — on the change in atomic mobility, surface distribution, and the shape of the concentration profile. The barrier effect of the introduced gas is associated with structural-phase changes in the surface layers by the occurrence of gas-filled pores and a substitution solid solution in the surface layers, which transforms into a substitutional solid solution away from the surface. Additional studies have shown that the barrier effect of the introduced inert gas on diffusion during subsequent exposures is observed not only on iron, but also on copper and aluminum. This effect is especially pronounced during the subsequent ion bombardment of copper and aluminum saturated with one or another inert gas in a krypton or argon medium as compared to the subsequent pulsed compression or deformation under martensitic transformations. This suggests the universal nature of the discovered regularity.*

*It should be noted according to autoradiographic studies that the presence of an inert gas, which slows down the transfer of matter during subsequent treatments, does not change the nature of the distribution of atoms. There is diffusion over the grain volume with some depletion of the surface layer, and the concentration profiles are described by an exponential dependence on the square of the penetration depth. Therefore, the mechanism of volume diffusion is preserved over the entire range of temperatures and strain rates, and also does not depend on the type of external influence applied. This is true for native atoms and atoms forming solid solutions of various types: substitution (nickel), interstitial (carbon), subtraction (argon and krypton).*

**Keywords:** diffusion, atomic mobility, inert gases, glow discharge, pulsed loading.

Одержано редакцією 10.07.2019  
Прийнято до друку 16.09.2019