

## CRYSTAL-LATTICE DEFECTS

PACS numbers: 68.35.Dv, 68.35.Fx, 68.55.Ln, 75.80.+q, 81.05.U-, 81.40.Vw

### Взаємодія міді з вуглецем за високоінтенсивних впливів

Д. С. Герцрікен, Н. В. Зайцева, В. Ф. Мазанко, Д. В. Миронов\*

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,  
бульв. Академіка Вернадського, 36,*

*03142 Київ, Україна*

*\*Самарський державний аграрний університет,*

*вул. Учбова, 1,*

*446442 Кінель, Росія*

Методами, заснованими на використанні радіоактивних ізотопів та рентгенівського випромінювання вивчено взаємодію нерозчинного за рівноважних умов Карбону з міддю у разі магнетно-імпульсної дії і обробки вибухом, які здійснювали за різними схемами. Показано, що під дією імпульсних деформацій без нагріву за 0,1–10 мкс відбувається дифузія Карбону в мідь на макроскопічній відстані. Встановлено особливості розподілу мігровних атомів та склад дифузійної зони. Визначено внесок різних чинників у закономірності протікання масоперенесення.

**Ключові слова:** дифузія, фазоутворення, рухливість атомів, магнетно-імпульсна обробка, вибухове навантаження, плоска, ковзна та циліндрична ударні хвилі.

Methods based on the use of radioactive isotopes and X-ray radiation are used to study the interaction of carbon insoluble in equilibrium conditions with copper during magnetic-pulse and explosion treatments, which are carried out according to various schemes. As shown, under the action of pulse deformations without heating, the diffusion of carbon into copper occurs at mac-

---

Corresponding author: Dina Solomonovna Gertsriken

E-mail: [deciatinka@gmail.com](mailto:deciatinka@gmail.com)

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,*

*36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

*\*Samara State Agrarian University*

*1 Uchebnaya Str., 446442 Kinel, Russia*

Citation: D. S. Gertsriken, N. V. Zaitseva, V. F. Mazanko, and D. V. Mironov, Interaction of Copper with Carbon under High-Intensity Impacts, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 6: 797–817 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.06.0797](https://doi.org/10.15407/mfint.43.06.0797).

roscopic distances during 0.1–10  $\mu\text{s}$ . The features of the distribution of migrating atoms and the composition of the diffusion zone are established. The contribution of various factors to the regularities of the transfer of matter is established.

**Key words:** diffusion, phase formation, mobility of atoms, magnetic-pulse treatment, explosive loading, plane, sliding, and cylindrical shock waves.

*(Отримано 5 березня 2021 р.)*

## 1. ВСТУП

Відомо, що в рівноважних умовах фазовий склад дифузійної зони, що утворюється у разі проникнення у метал атомів легких елементів, визначається особливостями взаємодії металу з Карбоном і Нітрогеном, Воднем і Оксигеном, що знайшло своє відображення у різному виді діаграм стану подвійних систем. Для одних металів характерне утворення твердих розчинів і фаз втілення (Fe, Ti), іншим властиво розчиняти елементи втілення без утворення хемічної сполуки у процесі термічного впливу (Ni–C), а можлива взагалі відсутність взаємодії, зокрема в міді  $\text{N}_2$  і C практично не розчиняються у твердій фазі [1–3].

Розчинність Карбону в міді незначна, менше 0,004 ат. % за передстоїчних температур [3]. У випадку взаємодії Карбону з міддю ні у твердому, ні в рідкому стані неможливо одержати фази втілення. Введений у розтоп міді графіт виділяється у разі охолодження. Хемічним же шляхом можна одержати карбіди міді  $\text{Cu}_2\text{C}_2$  і  $\text{CuC}_2$ . Дуже нестійкі і такі, що легко вибухають, карбіди міді (I), тобто  $\text{Cu}_2\text{C}_2$  частіше називають ацетиленідами, так як вони утворюються безпосередньо під час пропускання ацетилену через розчини солей металів. У разі пропускання через аміачні розчини солей міді ацетилену  $\text{C}_2\text{H}_2$  в осад випадає карбід (точніше, також ацетиленід) міді (II)  $\text{CuC}_2$  [4].

Другим шляхом одержання фаз втілення та пересичених твердих розчинів, які не існують у бінарних системах за рівноважних умов є імпульсні навантаження: іскрові розряди, вальцювання, ударне стиснення тощо [5, 6].

Отже розглянемо взаємодію металу з неметалом, нерозчинним у рівноважних умовах, на прикладі пари мідь–карбон, підданих таким високоінтенсивним швидкоплинним деформуванням, які відбуваються протягом кількох мікросекунд або їх десятих долей.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для деформування металів в імпульсному електромагнетному полі зі швидкостями деформації в інтервалі  $10^3$ – $5 \cdot 10^4$   $\text{s}^{-1}$ , використову-

вали промислову установку МІУ-23, яку застосовують для магнетно-імпульсного зварювання (МІЗ) і магнетно-імпульсної обробки (МІО) без нагріву (рис. 1). Енергія імпульсу магнетного поля становила 23 кДж. Рухливість атомів вивчали на циліндричних і трубчастих зразках з товщиною стінок до 1 мм і внутрішнім діаметром 2 см, виготовлених з міді чистотою 99,99% Cu. Мічені атоми Карбону  $^{14}\text{C}$  або атоми стабільного Карбону  $^{12}\text{C}$ , введені в мідь у плазмі жевірйного розряду за діодною схемою [7], знаходилися на зовнішній та внутрішній стінках трубок у вигляді концентраційного профілю протяжністю  $X \leq 5$  мкм та  $X \sim 100$  мкм і бічній поверхні циліндрів ( $X \leq 5$  мкм). Для порівняння на поверхні декількох циліндричних та трубчастих зразків наносили шар радіоактивного нікелю  $^{63}\text{Ni}$  товщиною до 1 мкм. У такому випадку стабільний або радіоактивний Карбон не використовували.

Перед деформацією зразки міді з Карбоном залишали за кімнатної температури або охолоджували у рідкому азоті чи сухому льоді. Циліндричні зразки вставляли з певним проміжком в середину трубчастих зразків і дану збірку піддавали магнетно-імпульсному навантаженню. Сутність процесу [8] полягає у зіткненні з великою швидкістю спочатку роз'єднаних деталей. Деформування досягається за рахунок потужного розряду емнісного накопичувача (конденсаторної батареї) на робочий орган-індуктор, всередині якого знаходяться зразки. Розрядний струм, що тече по індуктору, має коливальний характер, у результаті чого в зразках індуються вихрові струми. Взаємодія струмів індуктора і деталей викликає високошвидкісний рух і зіткнення металевих трубки та циліндра. Протягом  $0,4\pi$  (першого напівперіоду струму) зовнішній зразок витягували паралельно осі, потім починався рух витягування кільцевої ділянки трубки у напрямку до осі: швидкість змінювалася пропорційно часу і досягала 150–300 м/с. Через  $0,3\pi$  трубчатий зразок вдаряв з усіх боків циліндричний зразок. Швидкість стиснення, співударяння і відповідно пластичної деформації варіювали змінюванням напруженості магнетного поля ( $10^6$ – $10^7$  А/м) та величини проміжку між трубчастим (зовнішнім) і циліндричним (внутрішнім) зразками. Ступінь деформації, яку визначали з відношення

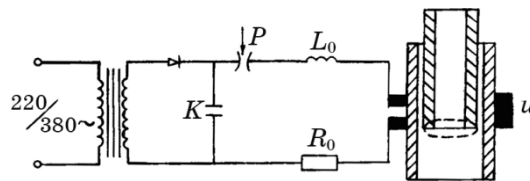
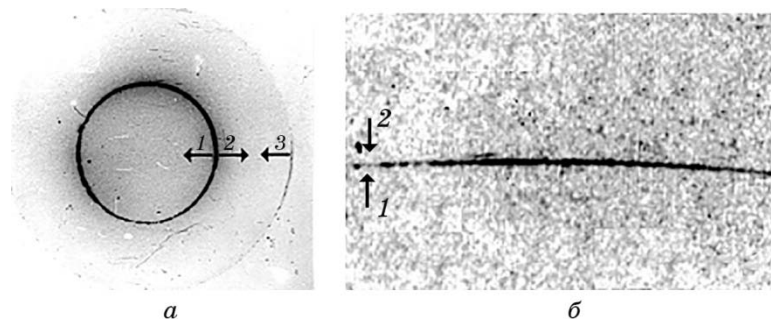


Рис. 1. Блок-схема установки ( $\dot{\epsilon} = 10^3$ – $5 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ ).

Fig. 1. Block-scheme of the installation ( $\dot{\epsilon} = 10^3$ – $5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ ).

площ перерізу стінок трубки та приповерхневого шару твiрного цилiндра розміром до 0,5 мм до і після співударяння, сягала значення  $\varepsilon \sim 0,5\text{--}1,2\%$ , а швидкість  $\dot{\varepsilon} \sim (1\text{--}5) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ . Тривалість імпульсу струму перебувала в межах 5–10 мкс. Час взаємодії зразків не перевищував 3–4 мкс.

Про процес руху зразка паралельно осі можна було судити по зміні початкової та кінцевої площ кільцевого перерізу. Оскільки глибина проникнення електромагнетного поля, частота якого коливалася в межах 30–50 кГц, не перевищувала товщини стінки зовнішньої трубки, на внутрішній зразок поле не впливало [9]. Отже, у зоні контакту металів мало місце тільки швидкоплинне механічне деформування, яке стимулює збільшення рухливості атомів поверхневих шарів контактувальних зовнішнього і внутрішнього зразків, водночас як дифузія атомів із зовнішньої поверхні зовнішнього зразка в глиб відбувається під одночасною дією імпульсного електромагнетного поля [ $H = (1\text{--}3) \cdot 10^7 \text{ А/м}$ ] та швидкісної пластичної деформації (рис. 2, а). Однак для дослідження розподілу та рухливості атомів  $^{14}\text{C}$  методами макро-, мікро- та електронномікроскопічної авторадіографії і фазового складу дифузійної зони ( $^{12}\text{C}$ ) за до-



**Рис. 2.** Макроавторадіограми перерізу (а) та зони контакту у повздовжньому напрямі (б) двох зварених методом МІЗ мідних зразків (суцільний і порожнистий циліндри), які у вихідному стані містили у приповерхневих шарах товщиною  $\sim 5$  мкм радіоактивний ізоп  $^{14}\text{C}$  або стабільний ізоп  $^{12}\text{C}$ , перерозподілений вглиб металів у разі деформації. Стрілками відмічено напрямки потоків та умови імпульсного навантаження: 1 — деформація ударом, 2 — імпульсне стиснення і деформація ударом, 3 — імпульсне стиснення і електромагнетне поле.

**Fig. 2.** Macroautoradiograms of section (a) and contact zone in the longitudinal direction (b) of two magnetically welded copper specimens (solid and hollow cylinders), which in the initial state contained in the near-surface layers with a thickness of  $\sim 5$   $\mu\text{m}$  radioactive  $^{14}\text{C}$  or stable  $^{12}\text{C}$  isotope redistributed deep into the metal floor deformation time. The arrows indicate the flow directions and conditions of the pulse load: 1—shock deformation, 2—pulse compression and shock deformation, 3—pulse compression and electromagnetic field.

помогою рентгеноструктурного аналізу зварені трубки або трубки з циліндрами розрізали по осі і ще навпіл (рис. 2, б). Кожну четвертину досліджували окремо.

Для дослідження процесу стиснення металу в імпульсному магнетному полі без зіткнення трубчастого та циліндричного зразків застосовували стиснення трубчастого зразка діаметром 5 см разом з вміщеною всередину по ковзній посадці суцільною гумовою оправкою циліндричної форми. На зовнішній та внутрішній твірній поверхні трубки були шари введеного в жеврійному розряді вуглецю (на внутрішню — за тріодною схемою [7]) з протяжністю шару близько 5 мкм. На контрольні зразки наносили гальванічні покриття з нікелю, який містив  $^{63}\text{Ni}$ , товщиною  $\sim 1$  мкм. Ступінь та швидкість деформації становили 7–7,5% і  $5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  відповідно. Тривалість дії деформівного імпульсу дорівнювала 15 мкс. Застосовували напруженість поля  $H = 3 \cdot 10^7 \text{ А/м}$  та  $H = 1 \cdot 10^7 \text{ А/м}$ . Авторадіографічний аналіз проводили за вищевказаною процедурою.

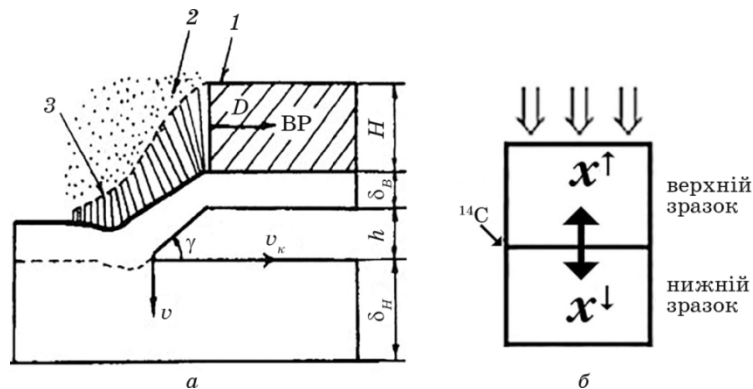
Для деформування із швидкостями  $1 \cdot 10^5$ – $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  застосовували навантаження за рахунок енергії вибуху.

Однією з найпоширеніших схем є така (рис. 3, а). На тверду основу встановлюють нерухому пластину. Другу пластину, яка повинна бути скинутою на нерухому пластину силою вибуху, розташовують паралельно першій на деякій відстані  $h_1$  і на її поверхні рівномірно розміщують заряд вибухової речовини (ВР) висотою  $H$ , наприклад, гранульованого амоніту або грануліту. Вибух здійснюють за допомогою детонаторів, розташованих на краю пластини. Швидкість детонації  $D$  становить близько 3–4 км/с. Деформування елементів у разі зіткнення відбувається наступним чином. Після ініціювання заряду детонаторами уздовж шару ВР поширюється ковзна детонаційна хвиля, за фронтом якої утворюються продукти вибуху, що створюють тиск 20–40 ГПа. Потім вони розлітаються зі швидкостями близько 1,5–3 км/с в сторони по нормалі до поверхні заряду. Водночас вони передають металевій пластині імпульс, під дією якого відбувається її рух до поверхні нерухомої пластини і зіткнення з нею.

Для здійснення плоского удару ініціювання заряду ВР проводять двома детонаторами, розташованими по краях рухомої пластини. Ця схема відрізняється від обробки ковзною хвилею відсутністю зсувної деформації за однакового значення загального тиску у фронті ударної хвилі. У разі навантаження ковзною та плоскою ударними хвилями у нерухому пластину запресовували масивну залізну обойму, в центр якої по ковзній посадці поміщали щільно обгорнуті мідною відпаленою фольгою (для запобігання розсіпання порошку) два поставлених один на одній мідні зразки висотою та діаметром 10 мм. Шари з міченими атомами (порошок графіту висотою близько 5 мкм, який містив рівномірно розподілений ізотоп Карбону  $^{14}\text{C}$  сумарною активністю до  $10^6$  імпульсів за хвилину) знаходилися на

торцях цих двох циліндричних зразків, які контактували один з одним.

Дослідження рухливості мічених атомів Карбону проводили в обох зразках від зони контакту в глиб міді (рис. 3, б). Кількість порошку (розмір порошинок не перевищував декількох 1–2 мкм), необхідного для шару достатньої товщини, визначали зважуванням та подальшим розрахунком. Рівномірність розподілу мічених атомів контролювали макроавторадіографією. Над верхнім зразком на одному рівні з обоймою знаходилася заглушка, виготовлена із заліза. Безпосередньо перед обробкою обойми із зразками охолоджували у рідкому азоті. Зауважимо, що приріст температури не перевищує 200°C. Тобто з урахуванням попереднього охолодження дифузія протікала практично за кімнатної температури. Тиск у процесі високошвидкісного деформування становив близько 20–40 ГПа. Слід зазначити, що у разі обробки за цими режимами зварювання не відбувалося.



**Рис. 3.** Схема процесу зіткнення пластини зі зразком [10]: 1 — фронт детонаційної хвилі; 2 — фронт розлітання продуктів вибуху ВР; 3 — фронт хвилі розрідження;  $D$  — швидкість детонації ВВ;  $v'$  — швидкість співударення пластин;  $v_k$  — швидкість переміщення динамічного кута зустрічі пластин у напрямі зварювання;  $\delta_B$  і  $\delta_H$  — товщини рухомої пластини та зразка (а). Розташування зразків у масивній обоймі, запресованій у нерухому пластину, і дифузійних зон по відношенню до напрямку удару та шару мічених атомів (б).

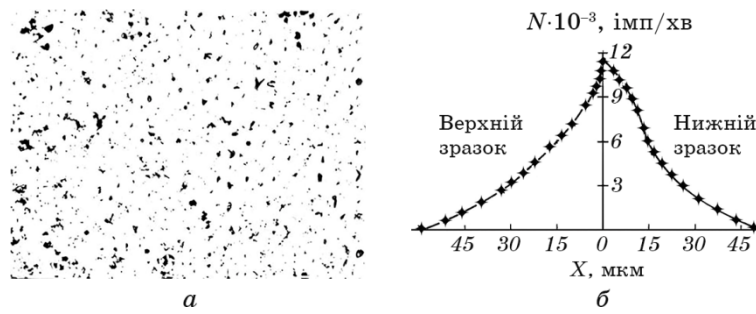
**Fig. 3.** Scheme of the process of impact of the plate with the sample [10]: 1 — detonation wave front; 2 — the front of the scattering of the products of the explosion of explosive substance; 3 — front of the rarefaction wave;  $D$  is the rate of detonation of explosives;  $v'$  — impact rate of plates;  $v_k$  — the speed of movement of the dynamic angle of the plates in the direction of welding;  $\delta_B$  and  $\delta_H$  — the thickness of the movable plate and the sample (a). The location of the samples in a massive holder pressed into a stationary plate, and diffusion zones relative to the direction of impact and the layer of labelled atoms (b).

Крім обробки вибухом пластин застосовували стиснення контейнера, розташованого по осі симетрії циліндричного заряду бризантної вибухової речовини, наприклад, ТГ 23/77 з щільністю 1,744 г/см<sup>3</sup>, швидкість детонації якого складала близько 8 км/с. Тобто це була циліндрична хвиля, яка сходилася на стінках контейнера. Як контейнер використовували стандартний пристрій збереження, який представляє собою металеву двошарову трубку довжиною 1,5 см і діаметром 3 см, виготовлену з двох різних металів, що мала вигляд коаксіально розташованих практично без проміжку трубок товщиною ~6 мм, заглушених з двох сторін. Звичайно, зовнішня трубка була сталевую. У даному випадку для запобігання проникнення у мідь атомів Феруму для вивчення взаємодії міді з Карбоном у внутрішню мідну трубку вставляли мідний стрижень діаметром ~6 мм з однаковим проміжком з усіх боків (~100 мкм), який заповнювали порошкоподібним графітом з *p/a* ізотопом <sup>14</sup>C, в деяких експериментах — порошком стабільного Карбону. Перед навантаженням контейнер охолоджували у рідкому азоті, щоб процес дифузії відбувався за кімнатної температури, оскільки, як показано в роботі [12], підвищення температури у разі обробки сягає близько 250–300°C. Амплітуда тиску у хвилі становила приблизно 50–75 ГПа. Тривалість навантаження не перевищувала 100–200 нс. Слід зазначити, відсутність зміни геометричної форми і розміру зразків, неспотворені межі зерен в міді після ударного навантаження, наявність в зернах тільки двійників дозволяють стверджувати, що у разі вибраної схеми навантаження рух за фронтом ударної хвилі проявляється у вигляді незначної пластичної деформації і переміщення частини атомів на значні відстані.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Розглянемо дифузію атомів Карбону в мідь із зони контакту з вуглецевим прошарком у верхній і нижній зразки у разі дії вибухового навантаження плоскою та ковзною хвилями із швидкостями деформації  $\dot{\epsilon} \sim (1-5) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  за кімнатної температури. Дослідження показали, що на відміну від деформування без нагріву із  $\dot{\epsilon} \sim 1-100 \text{ с}^{-1}$  за даних умов деформування відбувається проникнення у мідь Карбону з порошкоподібного шару. Так, у разі навантаження ударом за рахунок вантажу, що падає, для здійснення дифузії у метал, в якому він не розчиняється, робили одночасну деформацію, наприклад, мідного зразка із насиченим у твердому карбюризаторі вуглецем залізним. Однак, у такому випадку відбувалася дифузія у мідь не лише атомів Карбону, але й Феруму.

Як видно з рисунку 4, *a*, у випадку нанесення удару по нормалі до поверхні виникає рівномірний розподіл мічених атомів, причому це справедливо для верхнього та нижнього зразків і не лише на по-



**Рис. 4.** Авторадіограма-репліка,  $^{14}\text{C}$ ,  $\times 3600$  (а) та концентраційні профілі розподілу Карбону  $^{14}\text{C}$  у міді (б) у разі деформування плоскою ударною хвилею.

**Fig. 4.** Autoradiogram-replica,  $^{14}\text{C}$ ,  $\times 3600$  (a) and concentration profiles of carbon  $^{14}\text{C}$  distribution in copper (b) during deformation by a plane shock wave.

верхні кожного з них, але й у площинах, паралельних поверхні по всій товщині дифузійної зони. Аналогічний характер має розподіл атомів Феруму  $^{55}\text{Fe}$  у разі самодифузії за тих самих умов вибухової обробки двох та десяти, поставлених один на одній, зразків [5]. Також, як і у випадку самодифузії Феруму має місце більша глибина проникнення у верхній зразок та вплив на глибину проникнення швидкості деформації (рис. 4, б).

Отже, спостерігаються імовірнісний характер концентраційного профілю та розташування мічених атомів  $^{14}\text{C}$  за об'ємом міді. Це дозволило обчислити значення коефіцієнтів дифузії (масоперенесення) у разі дії плоскої ударної хвилі (табл. 1). З розгляду табл. 1, видно, що рухливість атомів, яка характеризується значеннями коефіцієнтів дифузії (КД), залежить від положення зразків та швидкості деформації так само, як у разі деформування вантажем, що падає, або вальцюванням [5]. Відрізняються лише величини КД. Так, якщо за  $\dot{\epsilon} \sim 1\text{--}100 \text{ c}^{-1}$  рухливість атомів у твердому тілі спочатку

**ТАБЛИЦЯ 1.** Вплив швидкості деформації, розміщення зразків в обоймі (верхній або нижній), виду хвилі на рухливість атомів.

**TABLE 1.** The effect of strain rate, placement of samples in the holder (upper or lower), the type of wave on the mobility of atoms.

$\dot{\epsilon} \cdot 10^{-5}, \text{c}^{-1}$	Плоска хвиля				Ковзна хвиля	
	$X^{\uparrow}, \text{мкм}$	$X^{\downarrow}, \text{мкм}$	$D_M^{\uparrow}, \text{см}^2/\text{с}$	$D_M^{\downarrow}, \text{см}^2/\text{с}$	$X^{\uparrow}, \text{мкм}$	$X^{\downarrow}, \text{мкм}$
1	41	33	0,65	0,44	7,1	6,0
2,5	52	41	0,97	0,68	9,1	7,9
5	65	50	1,60	0,92	11	10

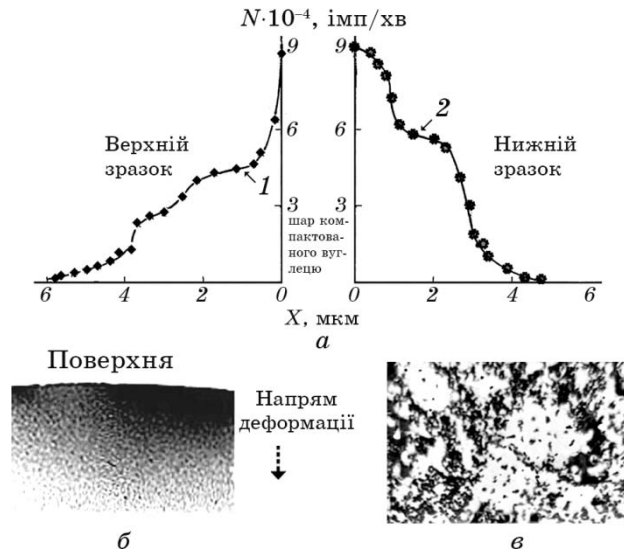


досягала, а потім перевищувала цей параметр у рідкому металі, то за  $\dot{\epsilon} \sim (1-5) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  рухливість атомів можна зіставити з КД у газах. Однак, це справедливо лише для деформування в умовах плоскої ударної хвилі.

Наявність дотичних напружень за даної обробки ковзною хвилею призводить до появи профілю, що не має експонентної форми (рис. 5, *a*), відсутності рівномірного розподілу, наявності перемішування у твердій фазі (рис. 5, *b, в*), про що свідчить нерівномірність почорніння у приповерхневих шарах та за глибиною проникнення на меншу глибину, і, водночас відсутня повторюваність форми концентраційних профілів.

Отже, у такому випадку не можливо визначити коефіцієнти дифузії. Але з розгляду даних, наведених у табл. 1, видно, що навіть у разі обробки ковзною хвилею є деякий вплив на проникнення атомів швидкості деформації та положення зразків.

Визначення фазового складу у разі вибухової обробки показало, у випадку дії плоскої ударної хвилі відбуваються помітне збільшення параметра кристалічної ґратниці міді ( $\Delta a_{\text{max}} \approx 0,0005 \text{ нм}$ ) і розши-



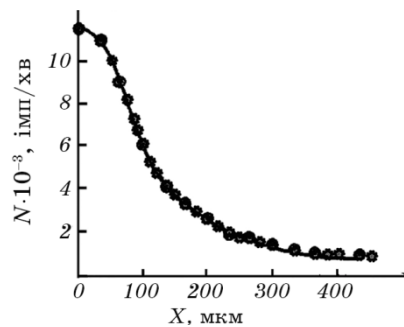
**Рис. 5.** Концентраційні профілі розподілу Карбону в міді у разі обробки ковзною хвилею (*a*), мікроавторадіограма, знята від поверхні в глиб металу на верхньому зразку,  $\times 300$  (*б*), авторадіограма-репліка, знята паралельно поверхні нижнього зразка на глибині  $\sim 1 \text{ мкм}$ ,  $\times 3600$  (*в*).

**Fig. 5.** Concentration profiles of carbon distribution in copper during treatment with a sliding wave (*a*), microautoradiogram taken from the surface into the depth of the metal on the upper sample,  $\times 300$  (*b*), autoradiogram-replica taken parallel to the surface of the lower sample at a depth of  $\sim 1 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $\times 3600$  (*c*).

рення дифракційних максимумів (приблизно в 1,5–1,8 разів), водночас зберігається ГЦК-симетрія твердого розчину вуглецю в міді. У разі дії ковзної хвилі окрім розширених ліній міді з невеликим збільшенням параметра ґратниці на рентгенограмах з'являться також розширені лінії графіту, причому співвідношення цих двох фаз у зоні проникнення є довільним по поверхні та у приповерхневому шарі. Що ж до шару вуглецю, то його протяжність ( $\leq 2$  мкм) недостатня для аналізу можливого проникнення міді у вуглець.

Розглянемо взаємодію Карбону з міддю за умов вибухової обробки у разі дії циліндричної ударної хвилі, що сходиться на ампулі збереження з внутрішнім мідним контейнером, в якому знаходиться контактний із стінками та мідним стрижнем порошок графіту, що містить  $^{14}\text{C}$ . Проведені експерименти показали, що в процесі імпульсного впливу за швидкості навантаження  $\dot{\epsilon}$  від  $1 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  до  $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  за 0,1 мкс відбувається проникнення Карбону приблизно на пів міліметра і більше. Наприклад, за  $2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  атоми Карбону зафіксовано у внутрішній стінці мідної трубки (контейнера) на глибині близько 520 мкм (рис. 6). У мідному стрижні — майже на 450 мкм. Тобто у зовнішній (верхній) зразок проникнення атомів Карбону відбувається на більшу глибину, ніж у внутрішній (нижній) аналогічно тому, що має місце у разі вибухової обробки пластин зі швидкістю деформації на порядок меншою (табл. 1).

Рухливість атомів у разі цієї обробки наведено у табл. 2. Як видно з порівняння результатів дії плоскої та циліндричної ударних хвиль (табл. 1 та 2), коефіцієнти дифузії за швидкості деформації  $10^6 \text{ с}^{-1}$  та більше перевищують КД за  $5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  майже у тисячу разів. Причому треба мати на увазі, що, згідно з [5, 6], перенесення речовини відбувається лише у разі дії деформівного імпульсу. Проте це порівняння є не зовсім коректним, оскільки деформування циліндри-



**Рис. 6.** Проникнення  $^{14}\text{C}$  у мідний стрижень (внутрішній зразок) у разі вибухового навантаження циліндричною хвилею,  $2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ .

**Fig. 6.** Penetration of  $^{14}\text{C}$  into a copper kernel (internal sample) under an explosive load of a cylindrical wave,  $2 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ .

**ТАБЛИЦЯ 2.** Вплив швидкості деформації  $\dot{\epsilon}$  на дифузію Карбону в мідну трубку (зовнішній зразок)  $D_M^\uparrow$ , та стрижень (внутрішній зразок)  $D_M^\downarrow$ .

**TABLE 2.** The effect of strain rate  $\dot{\epsilon}$  on the diffusion of carbon into the copper tube (external sample)  $D_M^\uparrow$ , and the rod (internal sample)  $D_M^\downarrow$ .

$\dot{\epsilon} \cdot 10^{-6}, \text{c}^{-1}$	$D_M^\uparrow \cdot 10^{-3}, \text{cm}^2/\text{c}$	$D_M^\downarrow \cdot 10^{-3}, \text{cm}^2/\text{c}$
1	0,93	0,69
2	0,96	1,30
5	1,90	1,60

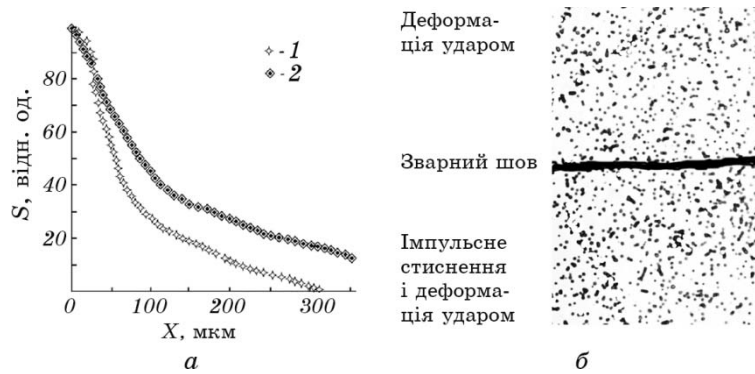
чною хвилею характеризується більшою енергією, ніж у разі використання плоскої ударної хвилі. Але і у цьому виді навантаження є спільні риси з вибуховою обробкою плоским ударом. Так, спостерігається залежність рухливості від положення зразка та швидкості пластичної деформації.

Порівняння одержаних у даній роботі глибин проникнення Карбону в мідь з результатами роботи [12], в якій вивчали дифузію у мідь Феруму та Галія за таких самих умов обробки, показує, що атоми металів мають більшу рухливість у міді, ніж атоми неметалевої домішки.

Зазначимо, що вуглецевий прошарок зменшується у разі навантаження як за рахунок проникнення атомів  $^{14}\text{C}$  у мідь, так і через процес компактування порошків приблизно утричі і становить близько 30–35 мкм. Атомів Купруму в ньому не виявлено, водночас як у міді виникає твердий розчин втілення Карбону з ГЦК-симетрією ґратниці.

Розглянемо дифузію Карбону в мідь у разі магнетно-імпульсного навантаження за різними схемами обробки.

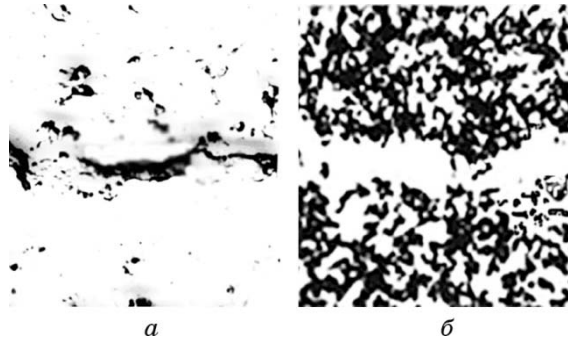
Зі зменшенням швидкості деформації, яка відбувається за кімнатної температури, до  $10^3$ – $5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$  в умовах магнетно-імпульсного впливу (порівняно з вибуховою обробкою), коли приріст температури не перевищує  $100^\circ\text{C}$ , глибина проникнення Карбону в мідь значно збільшується порівняно з тим, що відбувається у разі навантаження плоскою хвилею, але зменшується по відношенню до обробки стисненням ампули збереження циліндричною хвилею. Водночас зберігається експонентна залежність концентрації від квадрата глибини. І, як видно з рис. 7, ні у разі деформації ударом, ні у разі послідовної дії стиснення в імпульсному магнетному полі та зіткнення немає місця скупченню атомів Карбону. Отже, можна говорити тільки про виникнення твердого розчину Карбону в міді. Відзначимо, що як у разі вибухового, так і у разі магнетно-імпульсного впливу відбуваються збільшення параметра ґратниці Cu ( $\Delta a_{\text{max}} \approx 0,0008 \text{ nm}$ ) і розширення дифракційних максимумів (приблизно в 1,5–2 рази), але ГЦК-симетрія твердого розчину в міді зберігається.



**Рис. 7.** Проникнення атомів  $^{14}\text{C}$  із насиченого вуглецем шару протяжністю  $\sim 5$  мкм у мідь під дією співударяння зразків (1) та послідовної дії стиснення та співударяння (2) (а) і авторадіограма-репліка розподілу вуглецю, знята з дифузійної зони (див. рис. 2, б),  $\times 3600$ .

**Fig. 7.** Penetration of  $^{14}\text{C}$  atoms from a carbon-saturated layer with a length of  $\sim 5$   $\mu\text{m}$  into copper under the action of impact of samples (1) and sequential action of compression and impact (2) (a) and an autoradiogram-replica of carbon distribution taken from the diffusion zone (Fig. 2, б),  $\times 3600$ .

Дослідження зони контакту зварених зразків показало, що максимальна активність Карбону відповідає шву, який утворюється у разі цієї обробки. Порівняння з міграцією атомів металу у разі цього впливу показує, що має місце інший розподіл мічених атомів. Так, як видно з рис. 8, зона контакту зварених металів є збідненою



**Рис. 8.** Структура (а) та авторадіограма-репліка (б) зони контакту мідних зразків, які перед імпульсним навантаженням мали на поверхні гальванічні покриття товщиною 1 мкм, що містили ізоотп Нікелю —  $^{63}\text{Ni}$ ,  $\times 4800$ .

**Fig. 8.** Structure (a) and autoradiogram-replica (б) of the contact zone of copper samples, which before pulse loading had on the surface galvanic coatings with a thickness of 1  $\mu\text{m}$ , containing isotope of Nickel— $^{63}\text{Ni}$ ,  $\times 4800$ .

у порівнянні з тим, що має місце на відстані приблизно 1–2 мкм.

Наявність експонентних залежностей концентрації та об'ємного розподілу мічених атомів у разі магнетно-імпульсного впливу дозволила обчислити коефіцієнти дифузії (масоперенесення). Як видно з табл. 3, збільшення швидкості деформації призводить до зростання рухливості атомів Карбону, але вона все одно трохи менша за рухливість атомів металу у міді за аналогічних умов.

Отже, нерозчинний у міді Карбон та Нікель, що утворює з міддю безперервний ряд твердих розчинів, дифундують у мідь з приблизно однаковою швидкістю.

Порівняння отриманих результатів з літературними даними [5, 6, 8, 13] показує, що коефіцієнти дифузії Карбону в міді за порядком величини відповідають значенням  $D_M$  у разі дифузії за даних умов обробки атомів металів та інертних газів у різноманітні метали (від олова або цинку до ніобію чи молібдену). Крім того, вони характеризуються, як вже відмічалось, експонентним видом концентраційного профілю, об'ємним характером розподілу мічених атомів та практично однаковою залежністю від швидкості пластичної деформації. Тобто, незважаючи на особливості взаємодії Карбону з міддю у порівнянні з різними розчинними у міді металами за рівноважних умов, швидкість переносу Карбону в міді визначається, насамперед, видом обробки і швидкістю деформації, яку вона здійснює, а не природою матеріалу та дифузванту.

Порівняння наведених в таблиці 3 коефіцієнтів дифузії у зразках, підданих стисненню та співударянню і тільки співударянню, показує, що послідовна дія двох навантажень призводить до більшого зростання КД Карбону та Нікелю — приблизно у півтора рази — ніж удар, який відбувається тільки у разі зіткнення зразків. Але, якщо на внутрішню поверхню зовнішньої трубки не наносити шар мічених атомів, а лише на мідний циліндр, то стиснення зовнішнього зразка не буде впливати на дифузію. Проведені таким чином експерименти показали, що все одно має місце різна рухливість

**ТАБЛИЦЯ 3.** Вплив швидкості пластичної деформації  $\dot{\epsilon}$  на рухливість атомів  $D_M$ .

**TABLE 3.** The influence of the rate of plastic deformation  $\dot{\epsilon}$  on the mobility of atoms  $D_M$ .

$\dot{\epsilon} \cdot 10^{-3}, \text{c}^{-1}$	Деформація ударом $D_M \cdot 10^3, \text{cm}^2/\text{c}$		Стиснення магнетним полем та деформація ударом, $D_M \cdot 10^3, \text{cm}^2/\text{c}$	
	$^{14}\text{C}$	$^{63}\text{Ni}$	$^{14}\text{C}$	$^{63}\text{Ni}$
1	3,1	5,2	4,2	7,1
2,5	7,1	11,9	9,8	16,5
5	14,3	25,5	17,0	31,5

атомів у верхньому (зовнішньому) та нижньому (внутрішньому) зразках. КД Карбону за  $10^3 \text{ с}^{-1}$  та  $5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  у разі дифузії із внутрішньої поверхні зовнішньої трубки за умов деформації в момент співударяння перевищує КД у мідний циліндр в 1,35 та 1,32 рази відповідно. Тобто, у разі цього виду обробки теж існує вплив на дифузію положення зразка.

Розглянемо поведінку атомів Карбону на зовнішній поверхні трубчастого (зовнішнього) зразка. Оскільки Купрум і Карбон є діаманетиками, можна припустити, що вплив магнетного поля на їхню взаємодію не має сенсу враховувати, оскільки у кращому випадку його внесок повинен бути незначним. Тим більше, що в [5] практично показана відсутність будь-якої дії поля на самодифузію у феро- (Fe, Co), пара- (Al) і діаманетиках (Cu), мають значення лише механічні властивості використаних металів. Однак, у разі дифузії атомів феромагнетних елементів у діаманетик, наявність та величина поля впливала на швидкість їх проникнення. Крім того, в силу високої пластичності міді важко припустити значний вплив величини співударяння трубчастого і циліндричного зразків на дифузію вглиб міді із зовнішньої сторони. Тобто, у першому наближенні можна вважати, що дифузія Карбону в мідь у напрямку, показаному на рис. 2, а, стрілка 3, відбувається за одночасної дії стиснення в імпульсному магнетному полі, підвищених до  $T \sim 693 \text{ K}$  температур та деякого внеску деформації у разі зіткнення з циліндричним зразком.

Виявилось, що поверхневий шар товщиною 1–1,5 мкм та 2,5–3 мкм збіднені міченими атомами Нікелю та Карбону відповідно, але після збідненого шару є максимум і експонентна залежність від квадрату глибини. Однак глибини проникнення є нижчими приблизно втричі, ніж у разі співударяння зразків (стрілка 1 на рис. 2) та стиснення зразків з наступним співударянням (стрілка 2 на рис. 2). Оскільки після максимуму має місце рівномірний розподіл мічених атомів у площинах, паралельних поверхні, і концентраційний профіль описується залежністю  $C = \text{const} \cdot \exp(-X^2/4Dt)$ , то були обчислені коефіцієнти дифузії (табл. 3). Порівняння результатів, наведених у таблицях 3 та 4, показує, що стиснення зовнішньої поверхні трубки призводить до значно меншого значення рухливості атомів (на  $\sim 3$  порядки), незважаючи на більш високу температуру обробки ( $\sim 400^\circ\text{C}$ ). Це пов'язано з тим, що у разі імпульсного навантаження температура є слабкішим чинником за швидкість та умови деформування [5, 6].

Для коректного визначення можливого впливу зіткнення внутрішньої поверхні трубчастого з циліндричним зразком на дифузію із зовнішньої поверхні в глиб зовнішнього зразка було проведено такий експеримент. У разі стиснення за аналогічних умов обробки трубчастого зразка з нанесеними на зовнішню та внутрішню повер-

**ТАБЛИЦЯ 4.** Вплив швидкості пластичної деформації  $\dot{\epsilon}$  на рухливість атомів  $D_M$  у разі стиснення в магнетному полі. Дифузія іде в глиб із зовнішньої поверхні зовнішнього зразка (див. рис. 2, а, стрілка 3).

**TABLE 4.** Influence of the rate of plastic deformation  $\dot{\epsilon}$  on the mobility of atoms  $D_M$  under compression in a magnetic field. Diffusion goes deep from the outer surface of the outer sample (see Fig. 2, a, arrow 3).

$\dot{\epsilon} \cdot 10^{-3}, \text{c}^{-1}$	$D_M \cdot 10^3, \text{cm}^2/\text{c}$	
	$^{14}\text{C}$	$^{63}\text{Ni}$
1	2,1	3,8
2,5	3,1	6,2
5	6,2	8,9

хню шарами вуглецю ( $\leq 5$  мкм) або нікелю ( $\sim 1$  мкм) з твердим гумовим циліндром, розміщеним всередині трубки по ковзній посадці, протягом 15 мкс відбувалося перенесення речовини на макроскопічні відстані до 50 мкм. Крім того, досліджено впливи ще двох чинників: напрямку дифузії по відношенню до деформівного імпульсу та величини напруженості магнетного поля. У цих експериментах також спостерігалися збіднення поверхневого шару на декілька мікрометрів, експонентна залежність від квадрату глибини проникнення, рівномірність розподілу та відсутність скупчень мічених атомів. Коефіцієнти дифузії представлено у табл. 5.

Порівняння даних, наведених у таблицях 4 та 5, свідчить про те, що у разі міграції атомів із зовнішньої поверхні, тобто у напрямі дії деформації, рухливість атомів у разі стиснення без зіткнення майже на порядок менша за рухливість атомів із зовнішньої поверхні в глиб у разі деформування мідного трубчастого зразка разом з мідним циліндром. Отже, незважаючи на високу пластичність міді, співударяння трубки з мідним циліндром додатково пришвидшує дифузію і на протилежному боці стінки трубки.

**ТАБЛИЦЯ 5.** Вплив напруженості імпульсного магнетного поля на коефіцієнти дифузії у разі міграції атомів у напрямку деформації  $D_M^\downarrow$  та у протилежному напрямку  $D_M^\uparrow$ ,  $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^3 \text{c}^{-1}$ , 693 К, 23 кДж.

**TABLE 5.** Influence of the intensity of the pulsed magnetic field on the diffusion coefficients during the migration of atoms in the direction of deformation  $D_M^\downarrow$  and in the opposite direction  $D_M^\uparrow$ ,  $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^3 \text{s}^{-1}$ , 693 K, 23 kJ.

$H \cdot 10^{-7}, \text{A}/\text{m}$	$D_M^\downarrow \cdot 10^4, \text{cm}^2/\text{c}$		$D_M^\uparrow \cdot 10^4, \text{cm}^2/\text{c}$	
	$^{14}\text{C}$	$^{63}\text{Ni}$	$^{14}\text{C}$	$^{63}\text{Ni}$
1	3,4	6,5	1,1	2,0
3	3,8	9,9	1,2	2,2

Із розгляду таблиці 4 випливає ще одна закономірність: рухливість атомів у напрямку деформування майже втричі більша за рухливість атомів у протилежному напрямку. Причому це стосується атомів і Карбону, і Нікелю. Такий саме ефект має місце у разі деформування плоскою та ковзною ударними хвилями у разі вибухової обробки (див. табл. 1, 2). Але в останньому випадку різниця у значеннях коефіцієнтів дифузії вуглецю в обох напрямках нижча — лише приблизно в півтора рази.

Що ж стосується ролі імпульсного магнетного поля у пришвидшенні дифузії, то, як випливає з розгляду табл. 4, у разі помилки експерименту 10%, коефіцієнти дифузії вуглецю збільшуються всього на 11–12%, тобто реально це може бути на 1–2% у разі зростання  $H$  утричі. Для нікелю значення коефіцієнтів дифузії зростають майже у півтора рази. А от у разі дифузії вуглецю чи нікелю із внутрішньої поверхні стінки взагалі не було різниці у величинах КД, оскільки поле не проникає всередину трубки за межі стінки. Отже, можна стверджувати, що відмінності в значеннях коефіцієнтів дифузії у напрямку дії деформівного імпульсу та у протилежному напрямку пов'язані практично лише саме з цією обставиною, а не з присутністю поля.

Щоб оцінити роль температури у пришвидшенні дифузії вуглецю у мідь частину зразків охолоджували у різних середовищах до температури рідкого азоту (77 К) та сухого льоду (195 К). Враховуючи зростання температури на поверхні трубки за рахунок вихрових струмів ( $\sim 400^\circ\text{C}$ ) та деякий нагрів на повітрі у процесі встановлення гумового циліндра у трубку та розміщення її в установці для магнетно-імпульсної обробки (не вище за  $40\text{--}50^\circ\text{C}$ ), можна вважати, що міграція атомів відбувалася приблизно за температура  $\sim 693$ ,  $\sim 640$  та  $\sim 520$  К. Рухливість атомів за температур  $693$  К та  $640$  К виявилася однаковою з точністю до помилки експерименту (10%), а за температури  $520$  К була на  $\sim 15\%$  нижчою. Зауважимо, у разі ізотермічних відпалів за рівноважних умов різниця у  $\sim 50^\circ\text{C}$  значно впливає на коефіцієнти дифузії легких елементів чи металів. Водночас у разі імпульсних навантажень в інтервалі швидкостей деформації від  $0,5$  до  $10^4$   $\text{s}^{-1}$  у разі зниження  $T$  до температури рідкого азоту енергія активації спадає до  $\sim 1$  Ккал/моль [14], і тому температура відіграє незначну роль у змінюванні коефіцієнтів дифузії у разі деформування за різних температур.

Отже, всі розглянуті чинники відіграють різну роль у реалізації пришвидшеного масоперенесення. Найбільшим є внесок схеми деформування (лише стиснення, лише співударяння, стиснення із наступним співударянням безпосередньо у місті зіткнення, стиснення із наступним співударянням на протилежній стінці трубчастого зразка). Також значною є роль швидкості деформації для всіх схем магнетно-імпульсного навантаження. Набагато менше на рухли-



вість атомів впливає природа дифузанта (тип твердого розчину, розчинність за рівноважних умов тощо). Що ж до виду матеріалу, у якому відбувається міграція атомів, то вона впливає значно менше, ніж вид дифузанта і, крім того, згідно з роботою [13], різниця між КД у разі само- та гетеродифузії елементів заміщення у різних матеріалах зменшується із збільшенням швидкості деформації, і за  $\dot{\epsilon} \sim 10^4 \text{ с}^{-1}$  вона практично зникає. Однак, у разі проникнення елементів втілення різниця все ж залишається, навіть у разі деформування з максимальною для магнетно-імпульсного навантаження швидкістю деформації.

Ще меншим є вплив на дифузію температури навантаження на відміну від ізотермічних рівноважних умов, де цей чинник є визначальним. Що ж до росту напруженості магнетного поля, то ним взагалі можна знехтувати, оскільки його внесок у зростання КД не перевищує 11–12% у разі величини похибки 10%. Тобто у разі магнетно-імпульсної обробки саме магнетне поле відіграє найменшу роль. Воно, насамперед, є лише джерелом імпульсного деформування з високими швидкостями деформації. Однак, слід зазначити, що у разі газових розрядів наявність, величина і напрямок магнетного поля помітно впливають на рухливість атомів і утворення фаз [7, 15]. Але це також не є безпосереднім впливом на дифузійні процеси. У цьому випадку змінюються особливості горіння жеврійного й іскрового розрядів, а це своєю чергою вже впливає на перенесення речовини та взаємодію елементів.

Розглянемо докладно перерозподіл атомів та фазоутворення у разі введення у метановій плазмі жеврійного розряду в мідь великої кількості Карбону і наступній дифузії у напрямку, позначеному стрілкою 3 на рис. 2, а. У цьому випадку має місце одночасна дія стиснення та співударяння із циліндричним зразком протилежної стінки трубки, а також підвищених до  $T \sim 693 \text{ К}$  температур. Наявність магнетного поля, як показано вище, можна знехтувати.

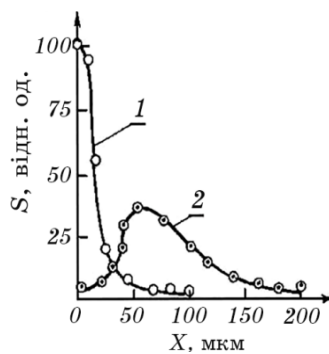
У результаті такого комплексу впливів змінюється форма концентраційного профілю розподілу Карбону в міді із зовнішньої поверхні трубчастого зразка в глиб металу. Так, у разі перерозподілу попередньо введеного Карбону  $^{14}\text{C}$  (рис. 9, крива 1) з'являється максимум на значній відстані від поверхні (рис. 9, крива 2). Вочевидь, поява максимуму пов'язана із стимульованими підвищенням температури поверхневого шару виділенням чистого графіту та утворенням карбідів міді  $\text{CuC}_2$  і  $\text{Cu}_2\text{C}_2$  безпосередньо у процесі деформування, водночас як за рівноважних умов карбіди міді утворюються лише шляхом хемічних реакцій. Проте на глибинах понад 50 мкм, розподіл наближається до експонентної залежності концентрації від квадрата глибини.

Цікаво, що у разі деформації міді з меншими швидкостями, тобто у процесі ударного стиснення за рахунок вантажу, що падає, ка-

рбиди міді або графіт у дифузійній зоні не з'являлися [5]. Однак у разі ізотермічної витримки ( $\sim 573\text{--}673\text{ К}$ ,  $10\text{--}30\text{ хв}$ ) з насиченої вуглецем міді починають виділятися атоми Карбону, і на поверхні міді виникає тонкий шар графіту. На рентгенограмі з'являються лінії графіту і твердого розчину вуглецю в міді з невеликим перевищенням параметра ґратниці чистої міді  $\Delta a_{\text{max}} \approx 0,0003\text{ нм}$ . Відпал протягом 1 години сприяє виходу практично всього вуглецю з міді.

Зазначимо, що попередні експерименти, які проводили на парі мідь–азот, показали подібні результати. Насичення міді проводили у плазмі жеврійного розряду в середовищі азоту з енергією йонів  $1\text{ кеВ}$  протягом 2 год. У результаті такої обробки утворився тільки метастабільний твердий розчин азоту в міді. Проведена після насичення імпульсна деформація зі швидкістю  $5 \cdot 10^3\text{ с}^{-1}$  за кімнатної температури привела до подальшої міграції азоту в глиб міді, причому концентраційний профіль, як і раніше, представляв собою експонентну залежність від квадрата глибини проникнення. Однак, нітридів міді  $\text{Cu}_3\text{N}$  з кубічною ґратницею типу  $\text{ReO}_3$  ( $a = 0,38146\text{ нм}$ ), які за рівноважних умов утворюються за температури  $573\text{ К}$  за реакцією  $3\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{NH}_3 \Rightarrow 2\text{Cu}_3\text{N} + 3\text{H}_2\text{O}$  [4], у разі імпульсного навантаження не спостерігалось навіть у незначній кількості.

Таким чином, деформування шляхом використання високоінтенсивних впливів призводить до аномально пришвидшеного проникнення нерозчинних легких елементів (атомів Карбону і Нітрогену) в мідь на макроскопічні глибини, до цього ж утворюються метастабільні тверді розчини втілення в міді. Але оскільки утворені тверді розчини є метастабільними, то у разі подальшого відпалу відбувається їх розпад, у результаті чого фазовий склад зони шва або поверхні, підданої обробці, приходить у відповідність з діаграмою ста-



**Рис. 9.** Концентраційні криві розподілу Карбону  $^{14}\text{C}$  у міді: 1 — після насичення, 2 — після імпульсного впливу ( $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^3\text{ с}^{-1}$ ,  $T = 693\text{ К}$ ).

**Fig. 9.** Concentration curves of distribution of carbon  $^{14}\text{C}$  in copper: 1—after saturation, 2—after pulse influence ( $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^3\text{ s}^{-1}$ ,  $T = 693\text{ K}$ ).

нів Cu–C та Cu–N.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Використання високоінтенсивних впливів в умовах зварювання і обробки вибухом і магнетно-імпульсних зварювання і обробки призводить до аномально пришвидшеного проникнення нерозчинних легких елементів в мідь на макроскопічні глибини, до цього ж утворюються метастабільні тверді розчини втілення в міді.

2. Аналіз результатів, одержаних у разі вибухового навантаження з різним типом хвиль (плоска, ковзна та циліндрична) та у разі дії магнетно-імпульсного навантаження, виконаного за різними схемами, показує, що їх неможливо порівнювати в залежності від швидкості деформації, як це відбувається у разі удару, вальцювання та інших видів імпульсних впливів з меншими енергіями, ніж застосовані у даній роботі.

3. У протіканні процесу масоперенесення у разі високоінтенсивних видів обробки найвагомим чинником є саме вид обробки, схеми її реалізації, швидкість імпульсної деформації. Інші чинники: розташування зразків, температура, природа матриці та дифузанта, наявність магнетного поля — дають невеликий внесок або навіть такий, яким можна знехтувати.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. М. Е. Дриц, Н. Р. Бочар, Л. С. Гузей, Е. В. Лысова, Е. М. Падежнова, Л. Л. Рохлин, Н. И. Туркина, *Двойные и многокомпонентные системы на основе меди* (Ред. Н. Х. Абрикосов) (Москва: Наука: 1979).
2. Ю. Н. Коваль, О. М. Барабаш, *Кристаллическая структура металлов и сплавов* (Киев: Наукова думка: 1986).
3. *ASM Handbook Alloy Phase Diagrams* (ASM International: 1992), vol. 3.
4. О. М. Степаненко, В. М. Ледовских, Л. Г. Рейтер, *Загальна та неорганічна хімія. Ч. II* (Київ: Педагогічна преса: 2000).
5. Д. С. Герцрикен, В. Ф. Мазанко, В. М. Тышкевич, В. М. Фальченко, *Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий* (Киев: РИО ИМФ НАНУ: 1999).
6. В. М. Миронов, В. Ф. Мазанко, Д. С. Герцрикен, А. В. Филатов, *Массоперенос и фазообразование в металлах при импульсных воздействиях* (Самара: Самарский университет: 2001).
7. А. М. Штеренберг, В. Ф. Мазанко, Д. С. Герцрикен, В. М. Миронов, Д. В. Миронов, С. А. Бобырь, *Влияние тлеющих и дуговых разрядов на диффузионные процессы* (Москва: Инновационное машиностроение: 2018).
8. Л. Н. Ларинов, В. М. Фальченко, Д. С. Герцрикен и др., *Докл. АН СССР*, **239**, № 2: 312 (1978).
9. А. Л. Скрипниченко, *Импульсные методы обработки металлов*

- (Минск: Наука и техника: 1977), с. 23.
10. В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев, *Сварка взрывом в металлургии* (Москва: Металлургия: 1978).
  11. Д. С. Герцрикен, В. Ф. Мазанко, О. А. Миронова и др., *Доповіди НАН України*, № 8: 119 (2006).
  12. В. П. Алексеевский, Д. С. Герцрикен, Л. Е. Печентковская и др., *ЖТФ*, 49, Вып. 4: 893 (1979).
  13. Д. С. Герцрикен, А. М. Гусак, В. Ф. Мазанко, С. Є. Богданов, *МОМ*, № 1: 1 (2021).
  14. D. S. Gertsriken, V. F. Mazanko, Yu. N. Koval et al., *Вісник Черкаського національного університету. Серія Фіз.-мат. науки*, вип. 117: 40 (2007).
  15. В. Ф. Мазанко, Д. С. Герцрикен, В. М. Миронов, Д. В. Миронов, С. А. Бобир, *Искровой разряд и диффузионные процессы в металлах* (Киев: Наукова думка: 2014).

## REFERENCES

1. M. E. Drits, N. R. Bochar, L. S. Guzey, E. V. Lysova, E. M. Padezhnova, L. L. Rokhlin, and N. I. Turkina, *Dvoynye i mnogokomponentnye Sistemy na Osnove Medi* [Double and Multicomponent Systems Based on Copper] (Ed. N. Kh. Abrikosov) (Moscow: Nauka: 1979) (in Russian).
2. Yu. N. Koval and O. M. Barabash, *Kristallicheskaya Struktura Metallov i Splavov* [Crystal Structure of Metals and Alloys] (Kiev: Naukova Dumka: 1986) (in Russian).
3. *ASM Handbook Alloy Phase Diagrams* (ASM International: 1992), vol. 3.
4. O. M. Stepanenko, V. M. Ledovskikh, and L. G. Reuters, *Zagalna ta Neorganichna Khimiya. Chastyna II* [General and Inorganic Chemistry. Part II] (Kyiv: Pedagogichna Presa: 2000) (in Ukrainian).
5. D. S. Gertsriken, V. F. Mazanko, V. M. Tyshkevich, and V. M. Falchenko, *Massoperenos v Metallakh pri Nizkikh Temperaturakh v Usloviyakh Vneshnikh Vozdeystviy* [Mass Transfer in Metals at Low Temperatures under Conditions of External Influences] (Kyiv: RIO IMF NANU: 2001) (in Russian).
6. V. M. Mironov, V. F. Mazanko, D. S. Gertsriken, and A. V. Filatov, *Massoperenos i Fazoobrazovanie v Metallakh pri Impul'snykh Vozdeystviyakh* [Mass Transfer and Phase Formation in Metals under Impulse Influences] (Samara: Samara University: 2001) (in Russian).
7. A. M. Sterenberg, V. F. Mazanko, D. S. Gertsriken, V. M. Mironov, D. V. Mironov, and S. O. Bobyr, *Vliyaniye Tleyushchikh i Dugovykh Razryadov na Diffuzionnye Protssesy* [Influence of Glow and Arc Discharges on Diffusion Processes] (Moscow: Innovatsionnoe Mashinostroenie: 2018) (in Russian).
8. L. N. Larikov, V. M. Falchenko, D. S. Gertsriken, *Dokl. AN SSSR*, 239, No. 2: 312 (1978) (in Russian).
9. A. L. Skripnichenko, *Impulsnye Metody Obrabotki Metallov* [Impulse Methods of Metal Processing] (Minsk: Nauka i Tekhnika: 1977), p. 23 (in Russian).
10. V. M. Kudinov and A. Ya. Koroteev, *Svarka Vzryvom v Metallurgii* [Explosion Welding in Metallurgy] (Moscow: Metallurgiya: 1978) (in Russian).
11. D. S. Gertsriken, V. F. Mazanko, O. A. Mironova et al., *Dopovidi NANU*, No. 8: 119 (2006) (in Russian).

12. V. P. Alekseevsky, D. S. Gertsriken, L. Ye. Pechentkovskaya et al., *ZhTF*, **49**, Iss. 4: 893 (1979) (in Russian).
13. D. S. Gertsriken, A. M. Gusak, V. F. Mazanko, and S. E. Bogdanov, *МОН*, No. 1: 1 (2021) (in Ukrainian).
14. D. S. Gertsriken, V. F. Mazanko, Yu. N. Koval et al., *Visnyk Cherkaskoho Natsionalnoho Universytetu. Seriya Fiz.-Mat. Nauky*, Iss. 117: 40 (2007).
15. V. F. Mazanko, D. S. Gertsriken, V. M. Mironov, D. V. Mironov, and S. A. Bobyr, *Iskrovoy Razryad i Diffuzionnye Protsessy v Metallakh* [Spark Discharge and Diffusion Processes in Metals] (Kiev: Naukova Dumka: 2014) (in Russian).