ORCID: 0009-0008-8809-502X

В. Є. Яковлев

Кандидат фізико-математичних наук,
науковий співробітник, Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова, Київ, Україна,
zvik8883@gmail.com

DOI: 10.31651/2076-5851-2023-72-80 PACS (66.30.-h, 66.30.Pa, 81.05.-t)

ВПЛИВ ФАЗОВОГО НАГАРТУВАННЯ НА ДИФУЗІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВУГЛЕЦЮ І КОБАЛЬТУ В ЗАЛІЗОМАРГАНЦЕВИХ СПЛАВАХ

В результаті циклічних мартенситних перетворень (ЦМП) у метастабільних сплавах генеруються лінійні і площинні дефекти кристалічної будови (дислокації, дефекти пакування, межі субзерен і нанозерен). В області таких дефектів дифузійна рухливість атомів впровадження за низьких температур підвищується на порядки. Таким чином, у метастабільних сплавах на основі заліза ідею підвищення інтенсифікації низькотемпературної дифузійної рухливості з метою керування дифузійними процесами, що формують корисні властивості, можна реалізувати за рахунок внутрішнього чинника МП без використання будь-яких високоенергетичних дій. Прискорення дифузії атомів впровадження за рахунок γ–α–γ (ГЦК-ОЦК-ГЦК) МП показано експериментально. Вплив γ–ε–γ (ГЦК-ГЩУ-ГЦК) ЦМП на дифузійні процеси в сплавах з низькою енергією дефектів пакування й досі лишається практично не вивченим. [1-3]

Новим етапом розвитку методів оброблення металевих матеріалів з використанням дифузійних процесів може стати практична реалізація можливості підвищення дифузійної рухливості атомів, зокрема за низьких, технологічно зручних, температур. З огляду на це проблема істотного, на порядки величини, підвищення коефіцієнта дифузії в металевих системах носить виражений фундаментальний характер. Вона може бути вирішена за рахунок використання сильної залежності дифузійних характеристик від розмірів структурних і субструктурних елементів та основних видів дефектів кристалічної будови. Новий комплекс фізико-механічних характеристик, у тому числі і дифузійних, може сформуватися за подрібнення структури до ультрадисперсного та/або нанорозмірного рівня. Такий рівень подрібнення є досяжним за рахунок МП [11] .

Дифузійна рухливість атомів впровадження (на прикладі вуглецю) в метастабільних сплавах на основі заліза зростала в міру акумуляції внутрішніх напружень і накопичення дефектів кристалічної будови в процесі циклічних γ–ε–γ мартенситних перетворень. Основний приріст коефіцієнта дифузії і зменшення енергії активації дифузії спостерігали на етапі термоциклування, коли фіксували максимальний приріст густини дефектів кристалічної будови.

Встановлено, що коефіцієнти дифузії атомів кобальту та вуглецю в ревертованому аустеніті сплаву Г18С2, фазонагартованого циклічними γ–ε–γ мартенситними перетвореннями, підвищувалася не менше, ніж на три порядки. При цьому коефіцієнти дифузії за низьких температур порядку 100-200° С відповідали коефіцієнтам стаціонарної дифузії за температури 900°С-1000°С.

Показано, що циклічні γ–ε–γ мартенситні перетворення значно підвищують дифузійну рухливість атомів заміщення та впровадження. Різниця приросту глибини проникнення атомів збільшувалася за підвищення кількості циклів перетворень, але до

певної міри. Знайдено оптимальні умови проведення такого виду оброблень за наявних експериментальних даних, що дало також поштовх для проведення дотаткових досліджень у пошуку найменш енергозатратних режимів обреблення.

Прискорення ЦМП дифузії атомів впровадження за низьких температур оброблення вікриває можливості суттєвої оптиміхзації режимів оброблення та зниження температури цементації метастабільних залізомарганцевих і залізонікелевих сплавів для економії ресурсів та енергозатрат.

Стаття являє собою огляд раніше ортриманних даних в Інституті металофізики, зроблено загальні висновки відносно дифузійних характеристик атомів заміщення та впровадження для випадку залізомарганцевих сплавів.

Ключові слова: мартенситне перетворення, дифузія, фазове нагартування, метод радіоактивних ізотопів, дефекти кристаллічної будови, фазовий перехід.

2. Вступ

Фазові перетворення різного типу здатні ефективно впливати на дифузійну рухливість атомів заміщення і впровадження у метастабільних сплавах [1,8,9]. Ступінь і якість такого впливу залежать від структурного стану сплавів, який сформувався в результаті фазових перетворень. Фазові і структурні перетворення в металах і сплавах, які супроводжувалися об‘ємним ефектом і формували в результаті цього певну систему дефектів кристалічної будови, спричиняли інтенсифікацію дифузійних процесів і стимулювали масоперенесення атомів на макроскопічні відстані. Мартенситні γ-α-γ перетворення в залізомарганцевих сплавах, реалізовані за зсувним бездифузійним механізмом, суттєво прискорювали дифузію атомів в ревертованій вихідній фазі. Дифузійна рухливість атомів легівних елементів суттєво залежала від режимів охолодження і нагрівання, необхідних для реалізації відповідно прямих і зворотніх МП [2,7].

В залізомарганцевих сплавах протікають γ–ε–γ перетворення, в результаті яких густина дислокацій в ревертованій аустенітній фазі підвищувалася на порядок [3,10]. Різниця в підвищенні густини дислокацій викликана різною величиною об’ємного ефекту γ–α і γ–ε перетворень (3-4 % і 1,75 % відповідно). У залізомарганцевому ревертованому аустеніті з низькою енергією дефектів пакування багаторазові γ–ε–γ перетворення викликали накопичення хаотичних дефектів пакування, але не призводили до значної фрагментації структури і формування додаткових субмеж. Суттєва різниця структурного стану і ступеня дефектності кристалічної ґратки фазових складових, сформованих у результаті γ–ε–γ перетворень, вказували на необхідність додаткового дослідження впливу γ–ε–γ перетворень на закономірності дифузії в сплавах з низькою енергією дефектів пакування. В цій роботі вперше зроблено спробу пошуку оптимальних режимів інтенсифікації дифузійних процесів власне мартенситних γ–ε–γ перетворень та дефектів кристалічної будови, утвореної внаслідок дифузійної перебудови в процесі таких перетворень.

3. Методи

Методом радіоактивних ізотопів проведено дослідження впливу циклічних γ–ε–γ мартенситних перетворень на дифузійні характеристики кобальту та вуглецю у сплаві Г18С2.

Для нанесення шару радіоактивного вуглецю на сплав проводили його цементацію з використанням карбюризатора. Цементація сплаву призвела до насичення приповерхневого шару вуглецем і результуючої зміни його фазового складу. Аналогично проводили нанессення шарів кобальту.

Циклічні прямі γ–ε і зворотні ε–γ перетворення в сплаві послідовно реалізували в процесі охолоджень у рідкому азоті та наступних нагрівань у соляній ванні з температурою 380°С. При цьому досягали максимальної швидкості охолодження в інтервалі прямих перетворень (20 град/с) і нагрівання в інтервалі зворотних перетворень (80 град/с). Такий режим термоциклування призводив до гальмування релаксаційних процесів і забезпечував у результаті як прямих, так і зворотних перетворень ефективне накопичення дефектів будови, які здатні суттєво впливати на дифузійні процеси у фазонаґартованих сплавах. Після γ–ε–γ перетворень проводили дифузійний відпал фазонаґартованих сплавів.

Вимірювання дифузійних профілів вуглецю у сплавах, фазонаклепаних γ–α–γ та γ–ε–γ перетвореннями, провели, в одному випадку, після цементації і циклів перетворення, а в іншому – після наступного додаткового дифузійного відпалу за температур 100°С і 200°С. Виявилося, що дифузія вуглецю в результаті циклів відбувалася на суттєву глибину без дифузійного відпалу, а в результаті додаткового дифузійного відпалу макросокпічно зростала. У випадку для кобальту після термоциклування зразків за участі різної кількості γ–ε–γ перетворень їх додатково витримували протягом 2500 годин за температур 250 та 325°С, реалізовуючи таким чином цикл дифузійного відпалу, який додатково стимулював теплову дифузію атомів кобальту вглиб зразків. Час витримки за кінцевих температур циклування був при цьому малим порівняно з часом додаткового дифузійного відпалу.

3. Результати та обговорення

Аналіз розподілу атомів вуглецю за глибиною показав, що в результаті циклічних γ–ε–γ перетворень без додаткового дифузійного відпалу відбувавалося їх проникнення в об’єм сплаву на певну глибину. Уже після першого та десятого циклів перетворень глибина проникнення атомів вуглецю склала 150 мкм (точність вимірювання – 0,5 мкм) (рис. 1, криві 1 та 2). Збільшення кількості циклів приводило до подальшого проникнення атомів вуглецю. Після 200 циклів глибина проникнення склала відповідно 200 мкм (рис. 1, крива 3).

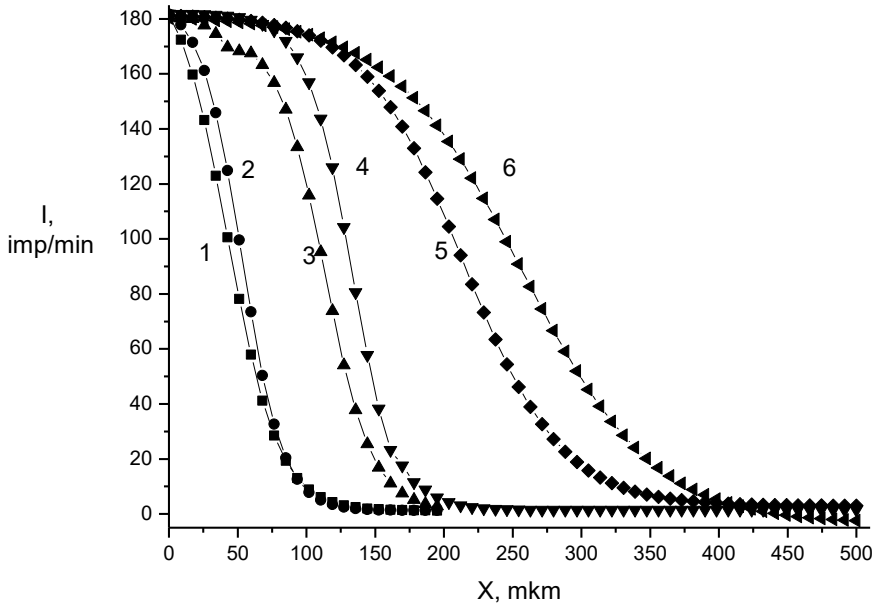

Рис. 1. Розподіл концентрації радіоізотопу ^{14}C за глибиною після одного (1), 10 (2) і 200 (3) γ↔ε циклів без відпалу та 10 (4), 100 (5) і 500 (6) γ↔ε циклів і дифузійного відпалу за 200°C протягом 2500 годин.

Fig. 1. Distribution of radioisotope 14C concentration by depth after one (1), 10 (2) and 200 (3) γ↔ε cycles without annealing and 10 (4), 100 (5) and 500 (6) γ↔ε cycles and diffusion annealing at 200°C for 2500 hours.

Механізм перенесення атомів вуглецю слід вважати пов'язаним із власне структурною ГЦК-ГЩУ-ГЦК перебудовою і супутнім результуючим поширенням силового поля напружень внаслідок зміни об'єму і форми кристалів, що перетворюються [4]. Збільшення глибини проникнення за умов повторення циклів перетворень свідчило про можливість акумуляції внутрішніх напружень, які послідовно стимулювали додаткову дифузію атомів. Очевидно, що цей механізм переміщення атомів впровадження можна вважати переважно атермічним [5].

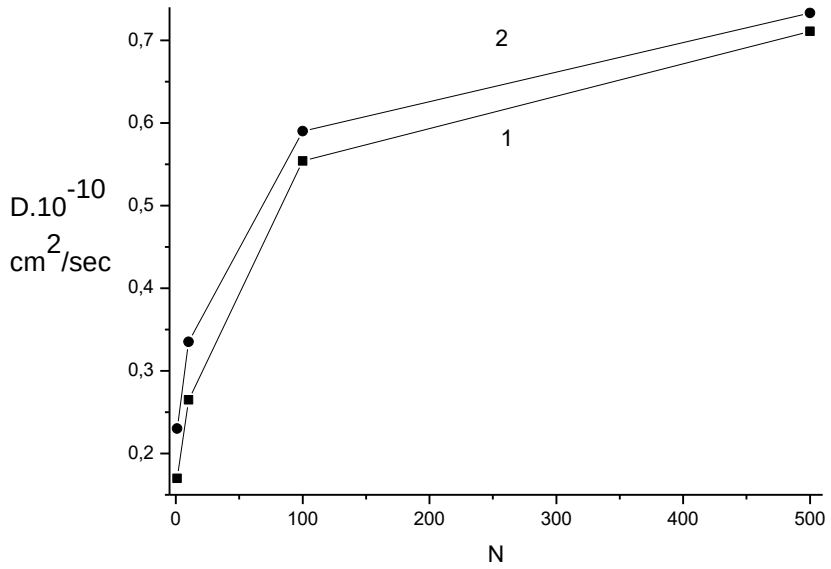

Рис. 2. Залежність коефіцієнта дифузії вуглецю D за температури дифузійного відпалу 100°C і 200°C відповідно (1, 2) від кількості γ↔ε циклів.

Fig. 2. Dependence of the carbon diffusion coefficient D at diffusion annealing temperatures of 100°C and 200°C, respectively (1, 2) on the number of γ↔ε cycles.

В процесі γ–ε–γ перетворень у локальних областях сплаву циклічно виникали внутрішні напруження розтягу і стиснення у відповідностю із знаком об'ємного ефекту прямого γ–ε (збільшення питомого об'єму) і зворотного ε–γ (зменшення питомого об'єму) перетворень. Розтягнені області виникали в результаті прямого γ–ε перетворення за низьких температур, коли релаксаційні процеси були загальмовані, і внутрішні напруження зберігалися. Це створило умови для переміщення атомів в такі області [4-6]. Очевидно, що зворотне ε–γ перетворення меншою мірою створювало умови для міграції атомів за атермічним механізмом.

З метою виявлення термічно активованої складової дифузії у фазонаґартованому сплаві Г18С2 в подальшому провели дослідження впливу ізотермічних відпалів на параметри дифузії. Після термоциклування зразків за участі різної кількості γ–ε–γ перетворень їх додатково витримували протягом 2500 годин за температур 200 °C,

реалізуючи таким чином цикл дифузійного відпалу, який додатково стимулював дифузію атомів вглиб зразків. Час витримки за кінцевих температур циклування був при цьому малим порівняно з часом додаткового дифузійного відпалу. Температуру відпалу обирали таким чином, щоб вона не перевищувала температури кінця зворотнього ε-γ перетворення для запобігання протікання процесів релаксації у фазонаґартованому сплаві. Різниця між температурами ізотермічного відпалу вибрана достатньою для можливості розрахунку значень енергії активації. Після термоциклування та додаткових ізотермічних відпалів кількість ε-фази в зразках складала понад 90%. Це свідчило про те, що дифузійні характеристики у фазонаґартованому сплаві відносилися переважно до мартенситної ε-фази.

Дифузійний відпал фазонаґартованого сплаву призвів до проникнення атомів вуглецю на макроскопічні відстані (рис. 1, криві 3,4,5). Наприклад, якщо після першого циклу перетворень глибина проникнення складала відповідно 130 мкм, то в результаті наступного відпалу за 200°С глибина зростала до 230 мкм (рис. 2, крива 4).

Розрахунки показали, що після першого циклу перетворень коефіцієнт дифузії вуглецю D за температур 100 та 200°С суттєво зростав. Збільшення кількості γ–ε–γ циклів від одного до ста призводило до стрімкого росту величини D (рис. 2, криві 1, 2). А результаті 100-500 циклів перетворень коефіцієнт збільшувався монотонно порівняно із першим циклом.

Для атомів заміщення дифузійний відпал фазонаклепаного сплаву призвів до проникнення атомів кобальту на макроскопічні віддалі (рис. 3). Наприклад, якщо після першого і сотого циклів перетворень глибина проникнення складала 12 мкм, то в результаті наступного відпалу за 325°С глибина значно зростала (рис. 3, криві 2, 3, 4).

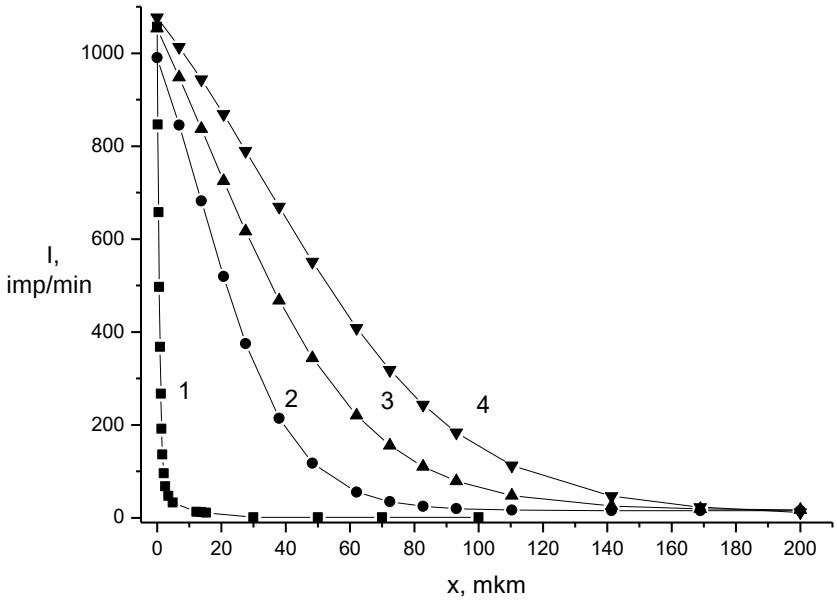

Рис. 3. Концентраційний розподіл атомів ізотопу кобальту в сплаві Г18С2 після нанесення ізтопу без відпалу (1), та після одного (2), 100 (3) та 500 (4) циклів та наступного дифузійного відпалу за температури 325 °С.

Fig. 3. Concentration distribution of cobalt isotope atoms in the G18C2 alloy after isotope deposition without annealing (1), and after one (2), 100 (3) and 500 (4) cycles and subsequent diffusion annealing at a temperature of 325 °C.

Таким чином, суттєва інтенсифікація дифузії атомів кобальту циклічними

γ–ε–γ–перетвореннями пов'язана із дією двох незалежних механізмів дифузії – атермічного і механізму термічної активації.

Основним механізмом інтенсифікації дифузії кобальту за рахунок термічно активованого механізму слід визнати прискорення дифузії в області дислокацій.

4. Висновки

Показано, що дифузія як атомів впровадження (на прикладі вуглецю), так і атомів заміщення (кобальт) циклічними γ–ε–γ мартенситними перетвореннями прискорюється в міру акумуляції внутрішніх напружень і накопичення дефектів кристалічної будови під час прямих та зворотніх МП.

Значне підвищення дифузійної рухливості атомів заміщення та впровадження циклічними γ-ε-γ мартенситними перетвореннями в залізомарганцевому сплаві Г18С2 відбувалося за рахунок дії двох незалежних механізмів – атермічного і термічноактивованого. Перший реалізувався в результаті зсувного характеру прямого γ-ε і зворотного ε-γ перетворень і визначався власне перетворенням завдяки знакозмінним напруженням під час перебудови ґраток. Інший механізм реалізувався в процесі дифузійного відпалу фазонаґартованого сплаву. В результаті термоциклування в ґратці накопичувались дефекти кристалічної будови – дислокації, низькокутові субмежі, хаотичні дефекти пакування, які були шляхами прискорення дифузії. При збільшенні ступеня фазового наґартування (до 500 γ-ε-γ циклів) глибина проникнення атомів ізотопу суттєво зростала, але максимальний приріст коефіцієнта дифузії спостерігався за 100 циклів перетворень**.**

Формування системи дефектів кристалічної будови метастабільних сплавів циклічними мартенситними γ-ε-γ перетвореннями та результуюче значне підсилення дифузійної рухливості атомів впровадження та заміщення за низьких температур відкриває нові додаткові перспективи інтенсифікації способів хіміко-термічного оброблення. За рахунок попереднього фазового наґартування температура поверхневої металізації та цементації метастабільних залізомарганцевих сплавів може бути пониженою на кілька сотень градусів.

Розділити внесок різних дефектів у зміну дифузійних характеристик на основі отриманих результатів не представляється можливим. Проте можна зробити якісний висновок про інтервали γ↔ε циклування, в яких вклад різних дефектів у інтенсифікацію дифузії в процесі наступного дифузійного відпалу проявлявся максимально. Аналіз закономірностей накопичення кожного із різних типів дефектів будови показав, в яких інтервалах термоциклування проявлявся вплив певного типу дефектів. Дію дислокацій, генерованих оберненим ε–γ перетворенням, спостерігали після першого циклу. Такі дислокації можуть бути розподілені хаотично в гратці кожної із фазових складових. Їхній просторовий розподіл може мати характер дислокаційної сітки. Від характеру розподілу дислокацій залежить ступінь інтенсифікації дифузійних процесів. У випадку формування дислокаційної сітки дифузія атомів вуглецю відбувається переважно вздовж дислокаційних трубок, які складають безперервний дифузійний шлях, і не проходить у бездислокаційних ділянках об'єму. Коефіцієнт дифузії у цьому випадку значно переважає коефіцієнт дифузії за умови хаотичного розподілу дислокацій.

Список використаної літератури:

1. Устинов А.И. Двойникование по системе {011} <011> мартенсита марганцевой стали / А.И. Устинов, Л.И. Лысак, В.Е. Данильченко, Ю.М. Полищук // ДАН СССР, Т. 224, №1, 1975, С. 76-79.

2. Бондар В.И. Кристаллическая структура мартенсита сплава Н31/ В.И. Бондар, В.Ю. Данільченко, В.А.Охрименко // Физика металлов и металловедение Т.66, В.1, 1988, С. 157-161.

3. Сагарадзе В.В. Фазовый наклеп и образование нанокристаллического Fe-Ni – аустенита при мартенситных γ–α–γ превращениях / В.В. Сагарадзе, В.Е. Данильченко, Ф. Леритье. // Физика металлов и металловедение, 2001, Т. 92, N4, С. 57-70.

4. Кабанова И.Г. Обнаружение ε–фазы и ориентационные соотношения Хэдли-Брукса при α-γ-превращении в сплаве Fe-32%Ni / И.Г. Кабанова, В.В. Сагарадзе, Н.В. Катаева, В.Е. Данильченко // Физика металлов и металловедение, 2011, Т. 112, № 4, С. 1-8.

5. Danilchenko V.E. Cyclic Martensitic Transformations Influence on the Diffusion of Carbon Atoms in Fe-18 wt.% Mn-2 wt.% Si Alloy/ V.E. Danilchenko, A.V. Filatov, V.F. Mazanko, V.E. Iakovlev // Nanoscale Research Letters, 2017,12:194. https://link.springer.com/article/10.1186/s11671-017-1978-z

6. Бевз В.П. Закономірності дифузії атомів вуглецю в нанофрагментованому залізонікелевому стопі / В.П. Бевз, В.Й. Бондар, Д.В. Верига, В.Ю. Данільченко, В.Ф. Мазанко // МиНТ, **2008**, т.30, №10, с.1307-1314.

7. Брик В.Б. Влияние фазовых превращений на диффузионную подвижность атомов в железомарганцевых и кобальтовых сплавах / Л.М. Кумок, Б.И. Николин, В.М. Фальченко // Металлы, №4, **1981**, С.131-135.

8. Миронов В.М. Диффузионные процессы в металлах и сплавах при мартенситных превращениях / Т.Ф. Миронова, Ю.Н. Коваль, Д.С. Герцрикен, В.В. Алексеева // Вестник СамГУ. **2006**. №3(43). С.134-145.

9. Коваль Ю.Н. Фазообразование при низких температурах в условиях мартенситных превращений со взрывной кинетикой / Д.С. Герцрикен, В.П. Бевз, В.М. Миронов, В.В. Алексеева, Т.В. Миронова // МиНТ, **2010**, Т.32, №10, С. 1293-1299.

10. Данільченко В.Ю. Фізичні принципи формування нанокристалічного аустеніту залізо нікелевих сплавів за допомогою циклічних мартенситних перетворень // МиНТ, 2008. Т30, №10, С. 1395-1411.

11. Лариков Л.Н. Диффузионные процессы в наноматериалах // МиНТ, 1995. Т.17, №1. С.3-29.

References:

1. Ustinov, A. I., Lysak, L. I., Danilchenko, V. E., & Polishchuk, Yu. M. (1975). Twinning on the {011}<011> system in the martensite of manganese steel. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 224(1), 76–79.

2. Bondar, V. I., Danilchenko, V. Yu., & Okhrimenko, V. A. (1988). Crystal structure of martensite in N31 alloy. *Physics of Metals and Metallography*, 66(1), 157–161.

3. Sagaradze, V. V., Danilchenko, V. E., & L'Heritier, Ph. (2001). Transformation-induced hardening and formation of nanocrystalline Fe-Ni austenite during γ–α–γ transformations. *Physics of Metals and Metallography*, 92(4), 371–385.

4. Kabanova, I. G., Sagaradze, V. V., Kataeva, N. V., & Danilchenko, V. E. (2011). Detection of ε-phase and Hadley–Brooks orientation relationships during α–γ transformation in Fe–32%Ni alloy. *Physics of Metals and Metallography*, 112(4), 1–8.

5. Danilchenko, V. E., Filatov, A. V., Mazanko, V. F., & Iakovlev, V. E. (2017). Cyclic martensitic transformations influence on the diffusion of carbon atoms in Fe–18 wt.% Mn–2 wt.% Si alloy. *Nanoscale Research Letters*, 12(1), 194. https://doi.org/10.1186/s11671-017-1978-z

6. Bevz, V. P., Bondar, V. I., Veryha, D. V., Danilchenko, V. Yu., & Mazanko, V. F. (2008). Regularities of carbon atom diffusion in nanofragmented iron–nickel alloy. *Materials Science and Technology*, 30(10), 1307–1314.

7. Kumok, L. M., Nikolin, B. I., & Falchenko, V. M. (1981). Influence of phase transformations on diffusion mobility of atoms in iron–manganese and cobalt alloys. *Metally*, (4), 131–135.

8. Mironova, T. F., Koval, Yu. N., Gertsriken, D. S., & Alekseeva, V. V. (2006). Diffusion processes in metals and alloys during martensitic transformations. *Bulletin of Samara State University*, (3), 134–145.

9. Gertsriken, D. S., Bevz, V. P., Mironov, V. M., Alekseeva, V. V., & Mironova, T. V. (2010). Phase formation at low temperatures under martensitic transformations with explosive kinetics. *Materials Science and Technology*, 32(10), 1293–1299.

10. Danilchenko, V. Yu. (2008). Physical principles of nanocrystalline austenite formation in iron–nickel alloys by cyclic martensitic transformations. *Materials Science and Technology*, 30(10), 1395–1411.

11. Larikov, L. N. (1995). Diffusion processes in nanomaterials. *Materials Science and Technology*, 17(1), 3–29.

V.E. Iakovlev
Candidate of Phisical and Mathematical Sciences, Researcher,
G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, Kyiv 03680, Ukraine,
zvik8883@gmail.com

PHASE HARDENING INFLUENCE ON THE DIFFUSION CHARACTERISTICS OF CARBON AND COBALT IN FERROMANGANESE ALLOYS

Martensitic transformation (MT) is the main type of phase transformations in solids and is characterized by a number of features that distinguish it from other phase transformations. It is characteristic of many alloys (based on Fe, Cu, Au, Ag, Co, Ti). The main features that unite all martensitic transformations into one group are diffusionlessness, regular movement of atoms, cooperativity and directionality of such movements in the process of restructuring the crystal lattice of the initial phase. MT is a powerful tool for creating materials with a wide range of new properties, primarily diffusional.

As a result of cyclic martensitic transformations (CMT) in metastable alloys, linear and planar defects of the crystal structure (dislocations, packing defects, subgrain and nanograin boundaries) are generated. In the region of such defects, the diffusion mobility of insertion atoms at low temperatures increases by orders of magnitude. Thus, in metastable iron-based alloys, the idea of increasing the intensification of low-temperature diffusion mobility in order to control diffusion processes that form useful properties can be implemented due to the internal factor of the MT without using any high-energy actions. Acceleration of the diffusion of insertion atoms due to γ–α–γ (fcc-bcc-fcc) MT has been shown experimentally. The influence of γ–ε–γ (fcc-gcc-fcc) MT on diffusion processes in alloys with low packing defect energy still remains practically unstudied.

A new stage in the development of methods for processing metallic materials using diffusion processes may be the practical implementation of the possibility of increasing the diffusion mobility of atoms, in particular at low, technologically convenient temperatures. In view of this, the problem of a significant, by orders of magnitude, increase in the diffusion coefficient in metallic systems is of a pronounced fundamental nature. It can be solved by using the strong dependence of diffusion characteristics on the sizes of structural and substructural elements and the main types of defects in the crystal structure.

The diffusion mobility of insertion atoms (for example, carbon) in metastable iron-based alloys increased as internal stresses accumulated and crystal defects accumulated during cyclic γ–ε–γ martensitic transformations. The main increase in the diffusion coefficient and the decrease in the diffusion activation energy were observed at the thermal cycling stage, when the maximum increase in the density of crystal defects was recorded.
It is shown that cyclic γ–ε–γ martensitic transformations significantly increase the diffusion mobility of cobalt and carbon atoms. The difference in the increase in the depth of carbon penetration increased with increasing the number of transformation cycles, but to a certain extent. Optimal conditions for carrying out this type of processing were found based on available experimental data, which also gave impetus to conducting additional research in the search for the least energy-consuming machining modes.

Acceleration of the CMT diffusion of the cobalt and carbon atoms at low processing temperatures opens up the possibility of significantly optimizing processing modes and reducing the cementation temperature of metastable ferromanganese and ferronickel alloys to save resources and energy costs.

The article is a review of previously obtained data, general conclusions are made regarding the diffusion characteristics of substitutional and insertion atoms for the case of iron-manganese alloys.

Keywords: martensitic transformation, diffusion, phase hardening, radioactive isotope method, crystal structure defects, phase transition.

Одержано редакцією 02.11.2023.
Прийнято до друку 06.12.2023.