

РОЗЧИННОСТЬ ВОДНЮ У МЕТАЛАХ ТА ЇХ СПЛАВАХ

Ан.Д. Золотаренко^{1,2}, Ол.Д. Золотаренко^{1,2}, З.А. Матисіна¹, Н.А. Швачко^{1,3},
Н.Є. Аханова^{4,5}, М. Уалханова⁵, Д.В. Щур^{1,6}, М. Т. Габдуллін⁴, Ю.І. Жирко⁶,
О.Д. Золотаренко¹, О.П. Рудакова^{1,2}, М.В. Чимбай^{1,2}, О.А. Каменецька¹

¹ Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України,
вул. Кржижанівського 3, Київ, 03142 Україна, e-mail: a.d.zolotareno@gmail.com .

² Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України, вул. Генерала Наумова, 17,
Київ, 03164 Україна, e-mail: o.d.zolotareno@gmail.com .

³ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект
Повітрофлотський, 31, Київ, 03037, Україна.

⁴ Казахстансько-Британський технічний університет (КБТУ) вул. Толе бі 59,
Алмати, 050040 Казахстан.

⁵ Національна нанотехнологічна лабораторія відкритого типу, Казахський національний
університет ім. Аль-Фарабі, пр. Аль-Фарабі, 71, Алмати, 050040 Казахстан.

⁶ Інститут прикладної фізики НАН України, 40000, м. Суми, вул. Петропавлівська, 58.

Оглядовий матеріал розкриває питання щодо впливу домішок на фізичні властивості сплавів, а також про роль газів в процесах у сплавах. Встановлено, що наявність водню впливає на дифузю у сплавах, а газу значно впливають на термоелектрорушійну силу металів.

У роботі подан опис ефекту додавання третього елемента до бінарних систем, що може розширювати або звужувати область існування впорядкованої фази. Наведені приклади додавання домішки ванадію або молібдену в сплав заліза та хрому, що підвищує температуру впорядкування.

Виявлено, що газу можуть значно впливати на термоелектрорушійну силу металів та підвищувати твердість і зменшувати їх пластичність, а також викликати їхню хрупкість та розширення. Показано, що водень (H_2) у сплавах (наприклад, у Fe-Ni та Au-Cu) впливає на дифузю та процеси атомного впорядкування. Також, мала концентрація водню, як домішки може змінювати електроопір сплавів (наприклад, у сплаві Pd-Au). Зазначено, що додавання третього елемента до бінарних систем може змінювати діаграму стану, що необхідно враховувати при вирішенні завдань з режимів термічної обробки сплавів, визначення умов фазової рівноваги і т.д.

У роботі розглянута залежність розчинності водню від температури в чистих металах (Cu, Fe та Al) та показана її залежність у сплавах від концентрації домішкових металів, а також показана температурна залежність розчинності водню у сплавах Fe-V.

Вивчено зсув густини станів при різному розподілі домішкових атомів у сплаві при системі порядок-безлад, а також досліджена залежність густини станів неупорядкованих та впорядкованих твердих розчинів.

Вказана залежність відносної розчинності атомів, які впроваджуються в пори сплавів з ГЦК структурою (типу Cu_3Au), з урахуванням розчинності від параметра χ , пропорційного мірі дальнього порядку в октаедричних та тетраедричних порах сплавів. Розглянута залежності відносної розчинності впроваджених атомів в октаедричних порах сплавів з ОЦК структурою (типу $CuZn$ та Fe_3Al).

Побудовані графіки залежності концентрації розчинених атомів домішок, від міри порядку для сплавів заміщення з ОЦК решіткою, де коефіцієнт M_2 впровадженний не залежить від міри порядку.

Також вивчений вплив тиску на міру дальнього порядку, де його ступінь зменшується або збільшується, чи зменшується, а потім збільшується та навпаки (фазовий перехід порядок-безлад).

Не менш важливим результатом є отримані залежності розчинності (c) від тиску (P) в невпорядкованих та впорядкованих сплавах.

Ключові слова: розчинність, домішки, твердий розчин, легування, багатокомпонентність, порядок-безлад, сплави, метали, молекулярний водень.

Розчинність - одна з найважливіших властивостей металів та сплавів. Введення домішок у сплав може змінювати їх механічні, електричні, магнітні та інші властивості. Граничні розчинності є однією з найважливіших властивостей металів і сплавів. Вони дозволяють визначити інтервал концентрацій елемента, у якому елемент розчиняється у сплаві без порушення однорідності твердого розчину. Це важливо для легування, яке широко використовується для зміни властивостей сплавів. Багатокомпонентні тверді розчини на основі чистих металів або бінарних сплавів є головними структурними складовими майже всіх сплавів, що використовуються на практиці.

Основні властивості металів і сплавів, які є важливими для їх використання в різних галузях, включають механічну міцність, корозійну стійкість, термостабільність, електро- та теплопровідність. Крім того, властивості металів можуть бути змінені легуванням, термообробкою та іншими методами. При побудові теорії розчинності, зазвичай, застосовуються певні модельні уявлення, які дозволяють встановити характер впливу домішок на фізичні властивості металу чи сплаву. Також властивості металів і сплавів можуть бути змінені під дією різних факторів, таких як тиск, температура, радіація тощо. Наприклад, на розчинність газу в металі сильно впливає домішка іншого елемента.

У літературі вже є велика кількість праць [1-27], в яких описується підготовка [1-6], обробка [7-10] металів та їх сплавів, а також проведено узагальнення експериментальних [11-18] та теоретичних [19-21] даних за однокомпонентними [22-23] або багатокомпонентними [24-27] стемами.

Вивчення цих матеріалів дозволяє встановити характер впливу тієї чи іншої домішки в металі чи сплаві на його фізичні властивості. Також це дозволяє вивчати метали та сплави, як каталізатори синтезу широкого спектру розчинних (фулерени [28-31], фулерити [32], ендофулерени [33]) та нерозчинних вуглецевих наноструктур (графіни [34-35], нанотрубки [36-37]) різноманітними методами синтезу [38-46]. Такі наноматеріали можуть використовуватися в адитивних технологіях [47-50], сонячній енергетиці [51-53], промисловості виготовлення сорбентів [54-62], медико-біологічній галузі [63-68] та водневій енергетиці, як матеріали паливних елементів [69-73] і для накопичувачів водню [73-77], де наноструктури конкурують із передовими сорбентами водню [78-95]. Це, не рахуючи композитів створених на їх основі [96-99].

З початку вивчення твердих розчинів заміщення [100], з'ясувався значний вплив домішок на електричні властивості сплавів. Відомо про вплив газів, розчинених у металах, на їх фізичні властивості. Газу майже завжди підвищують твердість та знижують пластичність, з'являється крихкість [101, 102]. Руйнування виробів у процесі експлуатації викликається впливом різних газів. Наявність водню (H_2) у сплаві впливає на його дифузію та на процес атомного впорядкування, що було виявлено у сплавах залізо – нікель (Fe-Ni), золото – мідь (Au-Cu) [103-106]. Водень змінює також електроопір сплавів,

наприклад, невеликий домішок водню в сплаві паладій – золото (Pd-Au) збільшували опір [101]. Виявлено сильний вплив газу (гідрогену) на термоелектрорушійну силу металів [101]. Домішка третього елемента до бінарного металу змінює вигляд діаграми стану. Ця обставина повинна враховуватися [107], наприклад, при вирішенні завдань з відпрацюванням режимів термічної обробки сплавів, при з'ясуванні можливості появи метастабільних фаз, при визначенні умов фазової рівноваги та інше. У разі бінарних систем, що упорядковуються, добавка третього елемента може розширювати або звужувати область існування впорядкованої фази. Наприклад, домішка ванадію (V) або молібдену (Mo) до сплаву залізо - хром (Fe-Cr) підвищує температуру впорядкування [108, 109], а домішка хрому (Cr) до залізованадієвого сплаву (Fe-V) знижує температуру впорядкування [108]. Додавання ванадію або ніобію (Nb) до титан-алюмінієвого сплаву (Ti-Al) також знижує температуру впорядкування, при цьому підвищується його жаростійкість [110].

Чинники, що впливають на розчинність елемента в металі або сплаві, можна розділити на *зовнішні* і *внутрішні*.

Зовнішні чинники, які впливають на розчинність, залежать від умов у яких перебуває система, тобто від температури, тиску. У роботі [111] показано, що залежність розчинності S від температури T виражається рівнянням:

$$S = K_{exp} - \frac{E_s}{kT}, \quad (1)$$

де K_{exp} – константа, E_s – теплота розчинності, k – стала Больцмана

На рис. 1 показаний характер залежності розчинності водню в різних металах, де a – точка плавлення, b – точка фазового перетворення в залізі. У рідких металах газ краще розчиняється, розчинність водню у твердому алюмінію (Al) дуже мала. Як видно з (1), залежність логарифму розчинності від зворотної температури має бути лінійною. За нахилом цієї прямої можна визначити теплоту розчинення.

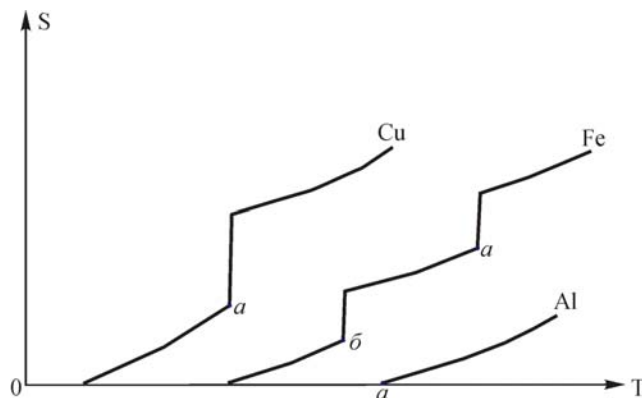


Рис. 1. Залежність розчинності водню від температури в Cu, Fe і Al

Газ, як правило, розчиняється в металах у невеликих кількостях, тому розчинені атоми не взаємодіють між собою. У цьому випадку розчинність пропорційна тиску P , якщо газ одноатомний, або пропорційна \sqrt{P} , якщо газ двоатомний, як H_2 або C_2 .

Внутрішні фактори, що впливають на розчинність, можна поділити на геометричні, фізичні та хімічні, де:

- Геометричним фактором є різний розмір атомів;
- Хімічними факторами розчинності є електронегативність, валентність;
- Фізичними факторами розчинності є структура, кількісне співвідношення компонентів, атомний порядок.

Наведені фактори розчинності певною мірою можна розглядати окремо, але вони впливають не тільки на розчинність, але й чинять взаємний вплив один на одного. Атом домішки деформує решітку, виникає розтягування чи стиснення решітки, змінюється параметр решітки. Якщо атоми сплаву відрізняються тільки розміром, то середній атомний діаметр і параметр решітки визначаються за правилом Вегарда, яке було виведено для неорганічних солей [112] і для твердих розчинів [113] та добре виконується, наприклад, для сплавів мідь – цинк (Cu-Zn) та срібло - цинк (Ag-Zn) [114, 115]. Якщо ж чисті компоненти відрізняються стисливістю, валентністю та електронегативністю [116-120], то середній атомний діаметр і параметр решітки не будуть лінійною функцією від складу сплаву. Наявність атомного порядку у сплаві призводить до того, що концентраційна залежність параметра решітки виявляється складною, на кривій цієї залежності можуть з'явитися злами або розриви.

У роботі [121] виявлено залежність атомного діаметра від ближнього порядку. У залізоалюмінієвих сплавах (Fe-Al) проявляється надструктура, і залежність параметра решітки від складу цих сплавів виявляється складною [122]. Порухення періодичності кристалічної решітки, викликане атомами доміжки, є серйозною перешкодою для розчинення. Атомне впорядкування сприяє відновленню періодичності решітки, при цьому створюється щільніша упаковка, зменшується параметр решітки. Тому часто явище впорядкування і хороша розчинність супроводжують одне одного і чинять взаємний вплив.

Експериментально встановлено, що електронегативність x елемента визначається валентністю n та атомним радіусом r : $x \sim \frac{n+1}{r}$ [123]. Атоми, що мають різну валентність (різну електронегативність), мають велику спорідненість. Це призводить до зростання стабільності сплаву, що сприяє атомному упорядкуванню.

Зміна структури металу чи сплаву (фазове перетворення) викликає раптову зміну розчинності. Два елементи утворюють безперервний ряд твердих розчинів, якщо кристалічна решітка розчину подібна до кристалічної решітки складових елементів. Такий випадок спостерігається у сплаві золото – срібло (Au-Ag).

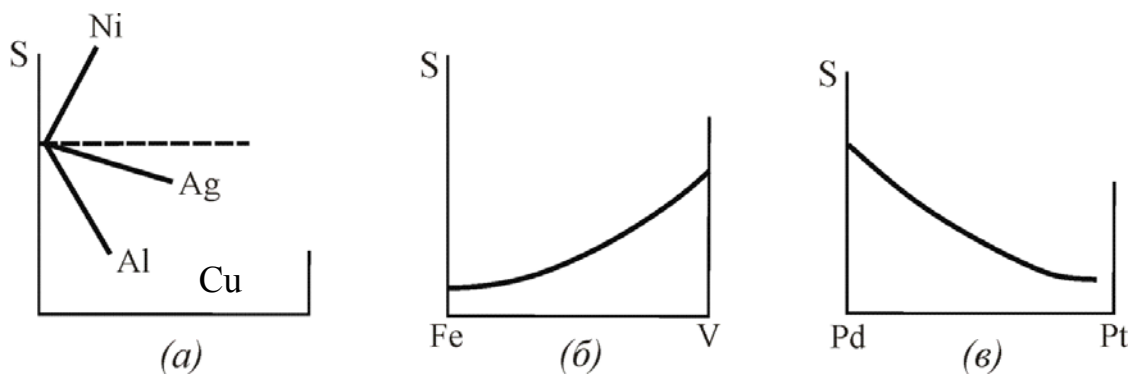


Рис. 2. Залежність розчинності водню у металі від концентрації домішкових металів [101]

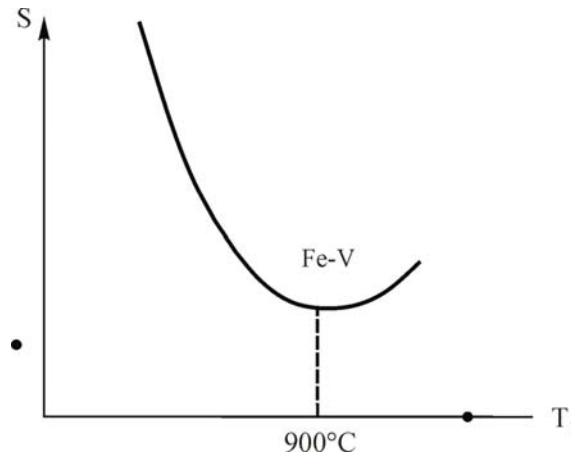


Рис.3 . Температурна залежність розчинності водню у сплавах Fe-V [124, 125]

На розчинність газу в металі сильно впливають домішки іншого елемента. Якщо метал має гарну розчинність, його домішки збільшують розчинність і навпаки. На Рис. 2 (а) показано залежність розчинності водню в міді (Cu) від концентрації нікелю (Ni), срібла (Ag) або алюмінію (Al) [101]. Характерні властивості металів проявляються (але не сумуються) у металі. Це видно з Рис. 2 (б) та Рис. 2 (в), де показаний характер концентраційної залежності розчинності водню в залізо-ванадієвих (Fe-V) та паладій-платинових (Pd-Pt) сплавах. Домішки впливають на температурну залежність розчинності. Так, наприклад, температурна залежність розчинності водню в залізованадієвих сплавах визначається не формулою (1), на кривій цієї залежності в сплаві з 22% ванадію спостерігається мінімум при 900°C, як показано на Рис. 3. Крім того, хоча в більшості випадків спостерігається збільшення граничної розчинності компонентів при нагріванні [124, 125] відповідно до формули (1), однак є рідкісні випадки звуження концентраційної області твердого розчину зі збільшенням температури сплаву [108]. У цих випадках зазвичай мають місце фазові перетворення. Тут позначається дія фізичних та хімічних факторів розчинення.

Для розуміння механізму розчинення слід враховувати електронну структуру сплаву. Домішковий атом у сплаві викликає появу збудженого поля, видозмінює атомну взаємодію. Це впливає на розподіл електронів у смугах за енергетичними рівнями, на густину станів $N(E)$. Якщо розподіл домішкових атомів у сплаві безладний, то має місце невелике зміщення кривої $N(E)$, як показано пунктирною лінією на Рис. 4 [126].

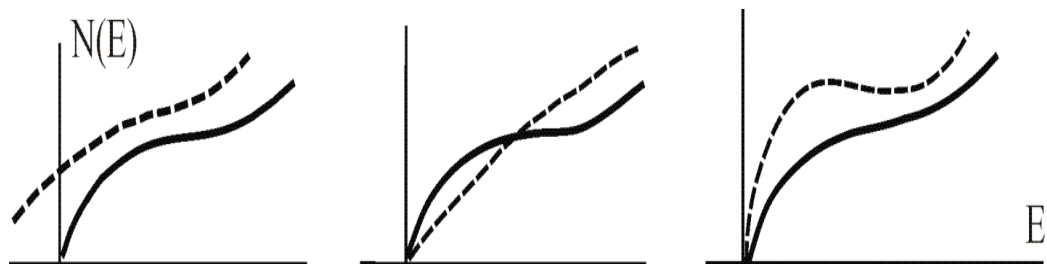


Рис. 4. Зсув густини стану при різному розподілі домішкових атомів у сплаві (пунктирні лінії – безладний розподіл домішкових атомів) [126]

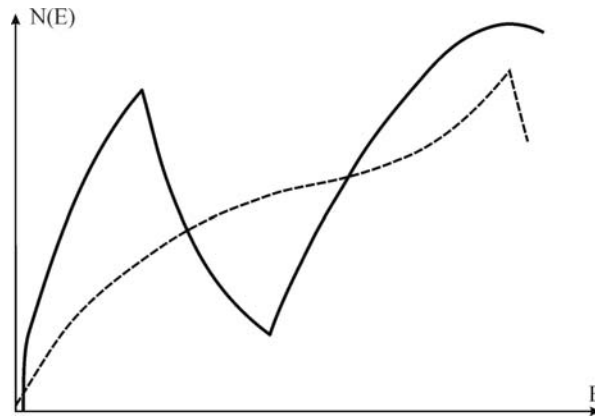


Рис. 5. Залежність $N(E)$ неупорядкованих (пунктирна лінія) та впорядкованих (суцільна лінія) твердих розчинів [127]

Якщо ж у сплаві проявляється надструктура, може спостерігатися розщеплення енергетичної смуги. На Рис. 5 подано схематичне зображення залежності $N(E)$ у разі неупорядкованих (пунктирна лінія) та впорядкованих (суцільна лінія) твердих розчинів [127]. Наявність домішкових атомів може спричинити появу електронних нерегулярностей, може бути порушена періодичність розподілу електронного заряду кристалу. Це призведе до структурних спотворень – усунення атомів із положень рівноваги [128]. Такі спотворення, своєю чергою, впливатимуть на розчинність і властивості твердих розчинів. Послідовна теорія розчинності повинна враховувати електронні стани твердих розчинів.

При побудові теорії розчинності, зазвичай, застосовуються певні модельні уявлення. Модель виявляється тим кращою, чим точніше її передбачення узгоджуються з результатами експериментальних спостережень. Зазвичай не всі чинники, що впливають на властивості сплавів, беруться до уваги в кожній моделі. Таке наближення виявляється хорошим, якщо вплив інших чинників слабкий. Тому при побудові теорії твердих розчинів часто використовуються молекулярно-кінетичні уявлення.

Теоретичне дослідження деяких фізичних властивостей сплавів (у тому числі і розчинності) може бути проведене без розгляду електронних станів. Молекулярно-кінетична теорія будується з урахуванням розподілу, переміщення і взаємодії атомів при використанні методів статистичної фізики із застосуванням термодинамічних функцій.

Атоми домішків залежно від їх розмірів розміщуються у вузлах кристалічної решітки або в міжвузлі. Тому ми розрізняємо тверді розчини заміщення і впровадження. Сплави різних металів є розчинами заміщення.

Розчинення водню, вуглецю, бору, азоту та інших елементів з малими атомними радіусами призводить до утворення сплавів впровадження. Як показано в [129], атомний радіус компонента впровадження повинен задовольняти умові:

$$r_{\text{вн}} < 0,59r, \quad (2)$$

де r – середній атомний радіус сплаву, в якому розчиняється домішки.

При цьому координація впроваджених атомів буде октаедричною (6 найближчих сусідніх атомів), якщо $0,41r < r_{\text{вн}} < 0,59r$, і тетраедром (4 найближчих сусідніх атома), якщо $r_{\text{вн}} < 0,41r$.

Як приклад сплавів впровадження можна назвати сплави, що упорядковуються Pd-Pt, Fe-V, Ni-Mn, Ni-Fe, Cu-Au, Cu-Pd з впровадженими атомами водню. У сплавах Pd-Nb, Pd-Ag, Cu-Au, Cu-Pd з воднем при високих температурах може виникати ближній порядок. Сплави ванадію (V), титану (Ti), цинку (Zn), ніобію (Nb) з вольфрамом (W) або молібденом (Mo) можуть містити впроваджені атоми вуглецю (C) у великій кількості,

оскільки вони утворюються в результаті взаємного розчинення так званих фаз впровадження [129].

Атоми домішків в метал або сплав потрапляють з другої фази. Розрахунок розчинності проводиться в припущенні, що система знаходиться в стані термодинамічної рівноваги. Це може бути або сплав (метал) в рівноважному стані з твердою фазою - джерелом атомів, що розчиняються, або твердий розчин (метал) в стані термодинамічної рівноваги з газоподібною фазою, що співіснує. Умовою рівноваги двох фаз є рівність температур, тисків і хімічних потенціалів.

Концентрація атомів домішків може бути легко оцінена, якщо атоми домішків в сплаві розміщуються по міжвузлю. Функція стану сплаву записується:

$$Z = \sum_n \exp \frac{-E_n}{kT} = \sum_\kappa \exp \frac{-E_\kappa}{kT} \sum_T \exp \frac{-E_T}{kT}, \quad (3)$$

де $E_n = E_\kappa + E_T$ – енергія системи в n -му стані. Вона складається з конфігураційної енергії E_κ , енергії теплових коливань і електронних станів, яка позначена E_T . Поява атома домішки змінює енергію сплаву. Конфігураційна енергія E_κ збільшується на величину μ (хімічний потенціал), а енергія E_T збільшується на величину ν . Перенесення атома C з другої фази в сплав AB вимагає витрати енергії

$$u_i = -iA - (z - i)B, \quad (4)$$

визначуваною сумою енергій парної взаємодії впровадженого атома C з найближчими атомами A і B сплаву. У формулі (4) $A = V_{AC}$, $B = V_{BC}$ – енергії взаємодії атомів, узяті із зворотним знаком, z – число найближчих сусідніх вузлів атома C в сплаві, з яких i вузлів зайняті атомами A і $z-i$ – атомами B . Різниця $u_i - \mu - \nu$ визначає потенційне поле, в якому розподіляються атоми C . Оскільки в кожне міжвузля може потрапити тільки один атом C , функція розподілу атомів C по міжвузлях повинна бути функцією типу Фермі. При малій концентрації атомів C можна взяти функцію розподілу Больцмана [130]. Тоді число атомів C , що знаходяться в i -х міжвузлях, буде рівна:

$$n_i = N_i \exp \frac{-(u_i - \mu - \nu)}{kT}, \quad (5)$$

де N_i – число міжвузлів в сплаві типу i (i -е міжвузля визначається кількістю атомів A в найближчих вузлах). Повне число атомів C , розчинених в сплаві, отримаємо, якщо підсумуємо (5) по i

$$n = \sum_i n_i = \lambda \nu \sum_i N_i \exp \frac{-u_i}{kT}, \quad (6)$$

де

$$\lambda = \exp \frac{\mu}{kT} \quad (7)$$

є абсолютна активність, а

$$\nu = \exp \frac{\nu}{kT} \quad (8)$$

є множник, на який збільшується коливальна частина функції стану (формулі (3)) при впровадженні атома C .

Розрахунок суми в (6) для неврегульованого сплаву призводить до наступного результату:

$$n_0 = \frac{m\lambda v}{a^3} (c_A e^{\frac{A}{kT}} + c_B e^{\frac{B}{kT}})^z, \quad (9)$$

де m - число міжвузля в кристалографічній комірниці сплаву, a - параметр ґратки, c_A , c_B - атомні концентрації компонентів A і B .

Формула (9) була отримана в [131] для сплавів з ГЦК структурами. Ця формула справедлива для усіх сплавів, кристалічна решітка яких така, що усі z найближчих вузлів до міжвузля знаходяться від нього на рівних відстанях. Такими, наприклад, являються також сплави з гексагональними щільноупакованими (ГЩУ) структурами. Якщо ж міжвузля оточене найближчими вузлами на різних відстанях, то енергія, що витрачається на перенесення атома C з другої фази в міжвузля, також визначається сумою енергій парної взаємодії атома C з найближчими атомами A і B , міститиме в собі енергії $A = V_{AC}$, $B = V_{BC}$, $a = v_{AC}$, $b = v_{BC}$, що відповідають різній відстані. Розрахунок для неврегульованого сплаву з ОЦК структурою [131] дає результат

$$n_0 = \frac{m\lambda v}{a^3} (c_A e^{\frac{A}{kT}} + c_B e^{\frac{B}{kT}})^l (c_A e^{\frac{a}{kT}} + c_B e^{\frac{b}{kT}})^{z-l}, \quad (10)$$

де l і $z-l$ – числа найближчих вузлів, що відповідають різним відстаням.

З формул (9), (10) видно, що для чистого металу, наприклад, A , коли $c_A = 1$, а $c_B = 0$, ці співвідношення переходять у формулу типу (1). Для сплаву ж залежність $\ln n$ від зворотної температури $1/T$ не буде лінійною, в (9) вона близька до лінійної, коли $\frac{|A-B|}{kT} \ll 1$. Якщо величина $\frac{|A-B|}{kT}$ порядку одиниці і енергетичні параметри A і B різних знаків, то на кривій залежності розчинності від температури може спостерігатися мінімум, як на Рис. 3. Залежність розчинності від складу монотонна, як це спостерігається в експериментах (Рис. 2).

Різниця енергій парної взаємодії атомів A - B може бути оцінена по значеннях теплоти розчинення. Користуючись першим законом термодинаміки, легко показати, що

$$\frac{A-B}{k} = \frac{\lambda_A - \lambda_B}{zR}, \quad (11)$$

де R – газова постійна. Знаючи теплоти розчинення λ_A , λ_B атомів C в чистих компонентах A і B , можна оцінити енергетичний параметр (11), що входить у формулу (9) для розчинності.

Атомне впорядкування в сплаві AB може як сприяти розчиненню в ній компонента C , так і ускладнювати розчинення. Розрахунок розчинності для сплавів, що упорядковуються, з ГЩУ структурою типу AB дає

$$n = \frac{2\lambda v}{a^3} \left[\left(c_A + \frac{1}{2}\eta \right) e^{\frac{A}{kT}} + \left(c_B - \frac{1}{2}\eta \right) e^{\frac{B}{kT}} \right]^3 \times \left[\left(c_A - \frac{1}{2}\eta \right) e^{\frac{A}{kT}} + \left(c_B + \frac{1}{2}\eta \right) e^{\frac{B}{kT}} \right]^3, \quad (12)$$

де η – ступінь далекого порядку. На Рис. 6, (а) показана залежність відносної розчинності від параметра χ , пропорційного мірі далекого порядку η .

$$f = \frac{n}{n_0} = (1 - \chi^2)^3, \quad (13)$$

де

$$\chi = \frac{1}{2} \eta \frac{e^{\frac{A}{kT}} - e^{\frac{B}{kT}}}{c_A e^{\frac{A}{kT}} + c_B e^{\frac{B}{kT}}}, \quad (14)$$

Оскільки $-1 \leq \chi \leq 1$, то, як це слідує з графіку, впорядкування зменшує розчинність атомів C . При $\chi \rightarrow \pm 1$ (це може бути при $\eta \rightarrow 1$) розчинність падає до нуля, тобто в повністю впорядкованому сплаві розчинність ускладнена. Отже, щоб розчинити атоми C в сплаві (наприклад, з метою зміни фізичних властивостей сплаву), потрібно зменшити η , підвищити температуру. Як показано в роботі [131], у сплавах з об'ємно-центрованою кубічною (ОЦК) і гранецентрованою кубічною (ГЦК) структурами впорядкування може сприяти розчиненню домішків. Це видно з Рис.6 і Рис.7, де приведено графіки залежності відносної розчинності атомів, що впроваджуються в октаедричні (Рис. 6, (б)) і тетраедричні (Рис. 6, (в)) пори сплавів з ГЦК структурою типу Cu_3Au і в октаедричні пори сплавів з ОЦК структурою типу CuZn (Рис. 7, (а)) і типу Fe_3Al (Рис. 7, (б)), від параметра χ (або χ_1 і χ_2). Параметри χ_1 і χ_2 визначаються формулами виду (14), для χ_2 в (14) енергії $A = V_{AC}$, $B = V_{BC}$ потрібно замінити на енергії $a = v_{AC}$ і $b = v_{BC}$. Для сплавів з ГЦК ґратками множник $\frac{1}{2}$ в цій формулі потрібно замінити на $\frac{1}{4}$. Для таких сплавів величина χ може набувати значень в інтервалі $[-\frac{1}{3}, 1]$, причому в інтервалі $[-\frac{1}{3}, 0]$ розчинність атомів впровадження в октаедричних порах росте з впорядкуванням. Для сплавів з ОЦК структурами відносна розчинність представлена поверхнею $f(\chi_1, \chi_2)$, причому для сплавів типу CuZn впорядкування сильно збільшує розчинність, коли χ_1 і χ_2 різних знаків, тобто коли різниці $A-B$ і $a-b$ різних знаків (це може бути, якщо потенційні криві $V_{AC}(r)$ і $V_{BC}(r)$ сильно відрізняються).

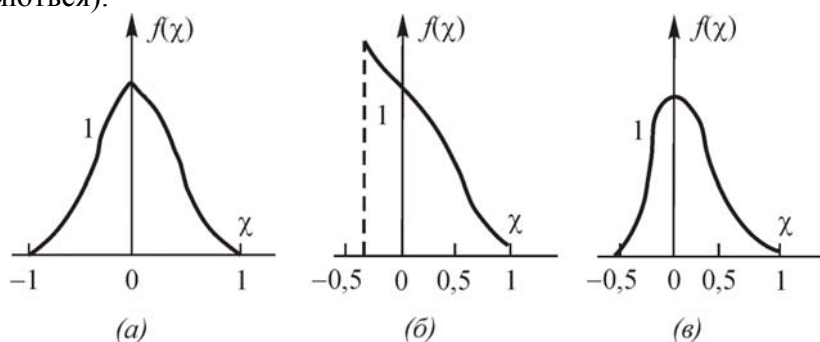


Рис. 6. Залежності відносної розчинності атомів, що впроваджуються в пори сплавів з ГЦК структурою типу Cu_3Au . (а) – розчинність від параметра χ , пропорційного мірі дальнього порядку η ; (б) - октаедричні пори сплавів; (в) – тетраедричні пори сплавів

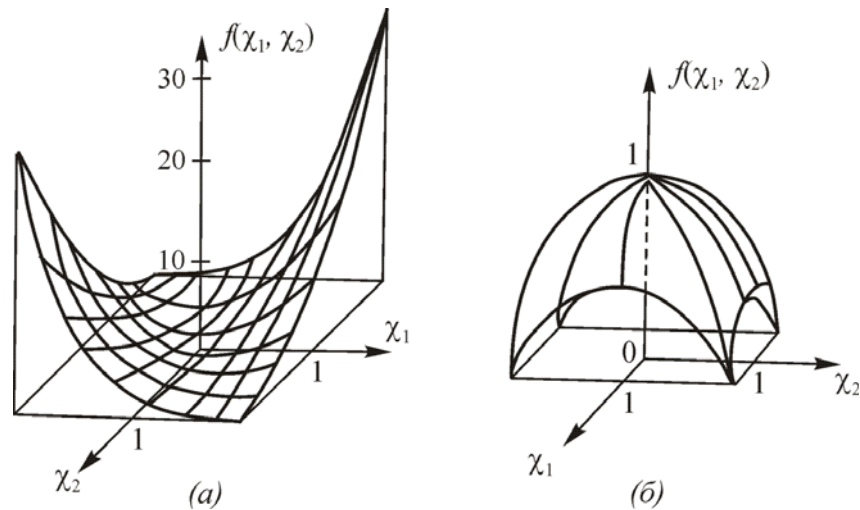


Рис. 7. Залежності відносної розчинності впроваджених атомів в октаедричні пори сплавів з ОЦК структурою. (а) – структурою типу CuZn; (б) – структурою типу Fe₃Al

У роботі [132] визначена концентрація розчинених атомів C в упорядкованих сплавах AB з ОЦК структурою, коли атоми C розташовуються вузлах кристалічної решітки.

$$c = \frac{1}{2} \lambda \nu \left[\left(\frac{c_A + \frac{1}{2}\eta}{c_A - \frac{1}{2}\eta} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \frac{8V_{AC} - 4V_{AA}}{kT} + \left(\frac{c_A - \frac{1}{2}\eta}{c_A + \frac{1}{2}\eta} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \frac{8V_{AC} - 4V_{AA}}{kT} \right] \quad (15)$$

З цієї формули виходить, що впорядкування сприяє збільшенню розчинності атомів C . Пояснюється це перерозподілом атомів C на вузлах першого і другого типу.

Формули (9), (10), (12) і (15) справедливі при статичному розподілі атомів в сплаві. Крім того, в цих формулах енергії парної взаємодії атомів вважаються постійними. Проте аналіз типових потрійних твердих розчинів показує, що їх не можна розглядати як системи із статичним розподілом атомів. Істотний вплив на кількісне співвідношення фаз і тому на загальну побудову потрійної діаграми чинить взаємодія атомів компонентів сплаву [133]. І оскільки міжатомна взаємодія залежить від складу сплаву, від порядку в розподілі атомів на вузлах кристалічної решітки, то спостерігається нерегулярність в зміні властивостей безперервних твердих розчинів зі зміною їх складу [134]. Серед багатьох класифікацій подвійних і потрійних металевих систем [100, 135-141, 142], проведених за різними ознаками, як наприклад, по виду діаграм стану, є класифікація, ґрунтована на характері міжатомного зв'язку [138].

Викладені обставини вказують на необхідність врахування залежності міжатомної взаємодії від складу і атомного порядку при дослідженні розчинності в сплавах.

У роботах [143-145] проведено дослідження розчинності в упорядкованих сплавах заміщення і впровадження з урахуванням об'ємних ефектів. У роботах [146, 147] вивчався вплив усебічного тиску на розчинність третього компонента у бінарних упорядкованих сплавах, що важливо для розуміння процесу впровадження.

Об'ємні ефекти беруться до уваги врахуванням залежності енергій взаємодії атомів від відстані між ними. Енергії парної взаємодії атомів апроксимуються часто вживаним в літературі потенціалом Леннарда - Джонса:

$$V_{\alpha\beta}(r) = \frac{a_{\alpha\beta}}{r^m} - \frac{a'_{\alpha\beta}}{r^n}, \quad m < n, \quad \alpha, \beta = A, B, C, \quad (16)$$

де m, n – цілі додатні числа, $a_{\alpha\beta}, a'_{\alpha\beta}$ – додатні константи. Параметр ґрат r змінюється із складом сплаву c і мірою його впорядкованості η , а в сплавах під тиском ще і з тиском P . Залежність $r(c, \eta)$ визначалася [148-150] з умови рівноваги сплаву (в результаті мінімізації вільної енергії F)

$$\partial F / \partial r = 0. \quad (17)$$

Розрахунок показав, що для більшості сплавів відносна зміна параметра решітки $\omega = (r-r')/r'$, де r' – середній параметр решітки, який визначається правилом Вегарда, може бути і додатнім і від'ємним, а по абсолютному значенню зменшується з впорядкуванням. Це підтверджується експериментально. Залежність міжатомної відстані від тиску приймалася лінійною [151-154]: $r = r_0(1-lP)$, $lP \ll 1$, де r_0 – відстань між сусідніми атомами в сплаві при $P = 0$, а l визначається стисливістю χ сплаву ($l = \frac{\chi}{3}$, де $\chi = -\frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial P}$, v – об'єм сплаву).

Вплив об'ємних ефектів і тиску на розчинність значною мірою залежить від виду потенційних кривих $V_{\alpha\beta}(r)$, точніше від значень параметрів $a_{\alpha\beta}, a'_{\alpha\beta}, m$ і n .

Для сплавів заміщення з ОЦК решітками концентрація атомів домішків, що розчиняється, визначається формулою [143]

$$c(\eta) = \lambda v (1+\eta)^{-\frac{1}{2}} (1-\eta)^{-\frac{1}{2}} \exp \frac{M_1 + M_2 \omega(\eta)}{kT}, \quad (18)$$

де M_1, M_2 – коефіцієнти, які не залежать від η і визначаються параметрами $a_{\alpha\beta}, a'_{\alpha\beta}, m$ і n . При $M_2 = 0$ об'ємні ефектів в сплаві відсутні. Формула (18) записана для сплаву стехіометричного складу. На Рис. 8 приведені графіки залежності $\ln \frac{c(\eta)}{c(0)}$ від η при $M_2 \neq 0$.

При $M_2 > 0$ в інтервалі $[0, \eta^*]$ впорядкування зменшує розчинність, як правило, розчинність збільшується зі збільшенням міри дальнього порядку.

Об'ємні ефекти призводять до деяких характерних особливостей температурної залежності розчинності. Як вказано в роботі [132], криві залежності $\ln c(\eta)$ від $1/T$ мають злам при температурі T_0 переходу порядок - безлад, якщо цей перехід є переходом другого роду. Об'ємні ефекти можуть привести до того, що перехід порядок - безлад буде переходом першого роду [148]. В цьому випадку функція, що визначає залежність $\ln c(\eta)$ від $1/T$, зазнаватиме стрибок при T_0 . Сtribок $\ln c(\eta_0) - \ln c(0)$, де $\eta_0 = \eta$ при $T = T_0$, буде додатнім.

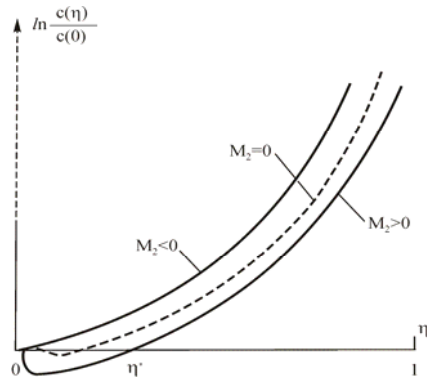


Рис. 8. Графіки залежності концентрації розчинених атомів домішків, від міри порядку (η) для сплавів заміщення з ОЦК решіткою, де M_2 – коефіцієнти, які, не залежні від η

Розрахунок розчинності атомів впровадження показує, що графіки відносної розчинності $f(\chi)$ або $f(\chi_1\chi_2)$ (Рис. 6 і Рис. 7) при врахуванні об'ємних ефектів сплющуються за рахунок останніх. Це означає, що відносна розчинність, як функція міри дальнього порядку, зменшується там, де вона більше одиниці, і збільшується там, де вона менше одиниці. Тому при незмінній мірі дальнього порядку об'ємні ефекти згладжують ефект зміни (зменшення або збільшення) розчинності з впорядкуванням. Проте, як показують дослідження, об'ємні ефекти сильно змінюють величину міри дальнього порядку в сплаві. Зміна параметра решітки кристала сприяє встановленню в сплаві більшого порядку. Оцінка розчинності в сплавах з ГЦК структурою і октаедричними порами впровадження показала, що при позитивних значеннях параметра χ за рахунок об'ємних ефектів може статися значне зменшення (більше, ніж в два рази) розчинності, а при від'ємних χ – збільшення приблизно в півтора рази. Цим можна пояснити збільшення приблизно в два рази розчинності водню в сплавах Ni - Mn і Ni - Fe [155] при їх впорядкуванні.

У сплавах з ОЦК решіткою можливий такий цікавий ефект: При сильній відмінності в ході потенційних кривих $V_{AC}(r)$ і $V_{BC}(r)$ параметри $\chi_1(\eta)$ і $\chi_2(\eta)$ можуть змінитися за рахунок об'ємних ефектів так, що замість, наприклад, зменшення розчинності з впорядкуванням (без урахування об'ємних ефектів) насправді ми спостерігатимемо збільшення розчинності з впорядкуванням (при врахуванні об'ємних ефектів).

При дослідженні впливу тиску на розчинність в упорядкованих сплавах, слід мати на увазі, що тиск чинить сильний вплив на міру впорядкованості сплаву [151]. На Рис. 9 показані можливі залежності $\eta = \eta(P)$ для сплавів заміщення з ОЦК структурою стехіометричного складу. Під впливом тиску ступінь дальнього порядку може зменшуватися (Рис. 9, (а)), збільшуватися (Рис. 9, (б)) і при деяких значеннях тиску P^0 (тиск впорядкування) в сплаві може відбуватися фазовий перехід порядок-безлад, при цьому можливе існування двох таких точок P_1^0, P_2^0 , в одній з яких порядок зникає, а в іншій з'являється. На Рис. 10 приведені графіки залежності розчинності від тиску, пунктирні криві відповідають неупорядкованому сплаву, а суцільні криві – впорядкованому. Розчинність в неупорядкованому сплаві з тиском збільшується або зменшується, графіки цієї залежності мають екстремум або ні, що визначається значеннями параметрів $a_{\alpha\beta}, a'_{\alpha\beta}, m$ і n у формулах (16) для енергій парної взаємодії атомів, тобто залежність розчинності від тиску визначається характером залежності потенційних енергій атомної взаємодії від міжатомної відстані. Усі ці випадки досліджені в наукових роботах [146, 174]. При тисках впорядкування P^0 на кривих залежності $c = c(P)$ з'являються злами. Криві залежності $c = c(P)$ відповідають графікам (а), (б), (в) і (г) Рис 9. Для сплавів з ГЦК решітками на кривих залежності $c(P)$ при тисках впорядкування P^0 спостерігатимуться не злами, а скачки. Крім того, у разі сплавів впровадження з ГЦК

грешітками характер залежності $c(P)$ буде різним для октаедричних і тетраедричних пір впровадження [147].

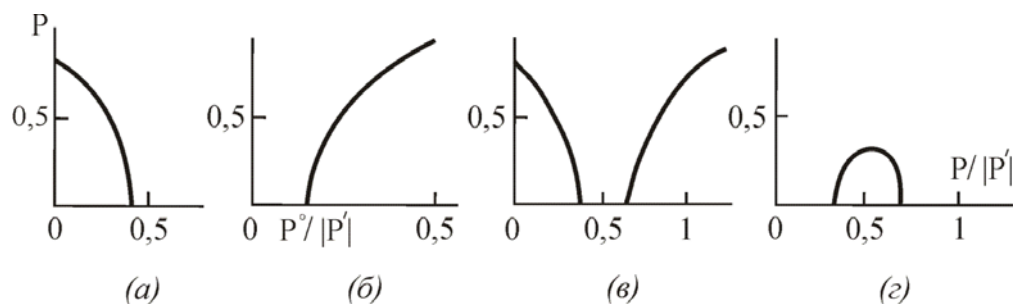


Рис. 9. Вплив тиску на міру дальнього порядку. (а) - ступінь дальнього порядку зменшується; (б) - ступінь дальнього порядку збільшується; (в) - ступінь дальнього порядку зменшується, а потім збільшується; (г) - ступінь далекого порядку збільшується, а потім зменшується (фазовий перехід порядок-безлад)

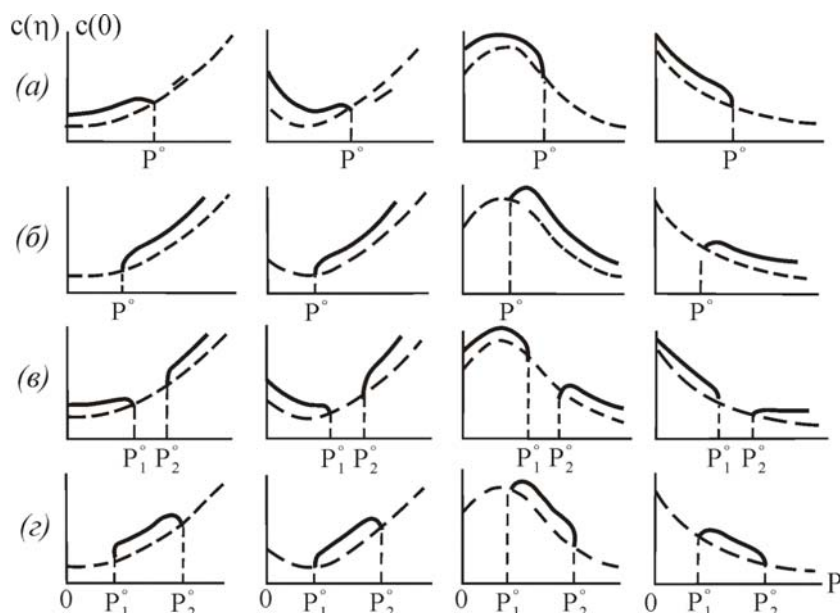


Рис.10. Графічні залежності розчинності c від тиску P . Пунктирні криві - неупорядковані сплави; суцільні криві - впорядковані сплави

Досліджуючи експериментально розчинність третього елементу у бінарних упорядкованих сплавах, можна з'ясувати ряд практично важливих питань. Оскільки розчинність істотним чином залежить від виду потенціалів взаємодії атомів сплаву з атомами розчиненого елементу, експериментальне дослідження розчинності дозволить отримати деякі відомості про характер залежності $V_{AC} = V_{AC}(r)$ і $V_{BC} = V_{BC}(r)$, про співвідношення енергій V_{AC} і V_{BC} , про залежність цих енергій від ступеня дальнього порядку при різних складах сплаву. Крім того, можна буде судити про рід фазового переходу порядок - безлад. Досліджуючи розчинність сплаву під тиском, можна з'ясувати, наприклад, який характер залежності енергій парної взаємодії атомів (чи деяких їх комбінацій) від тиску: чи відбуваються під впливом тиску фазові перетворення порядок - безлад, скільки точок таких перетворень є в сплаві, яка величина тиску впорядкування: в які пори (октаедричні або тетраедричні) для сплавів впровадження потрапляє атом розчиненого елемент і тому подібне. Якщо ж відомий характер впливу тиску на процеси впорядкування і на міжатомну взаємодію, для кожного конкретного сплаву можна

передбачити можливі закономірності залежності розчинності від тиску, а отже, передбачити можливу зміну властивостей сплавів під тиском.

Слідуює, проте, мати на увазі, що проведені дослідження впливу об'ємних ефектів і тиску на розчинність є суто якісними, передусім тому, що такі можливості молекулярно-кінетичної теорії, і не можна розглядати сплав просто, як джерело потенційного поля, що діє на ансамбль атомів розчиненого елемента. Розчинені атоми, видозмінюють це поле, що, у свою чергу, впливає на процеси впорядкування атомів.

Крім того, уточнюючи теорію, треба враховувати і кореляцію між заповненням вузлів решітки атомами різного сорту, і зміну оточення впровадженого атома в сплаві, і локальне спотворення кристалічної решітки навколо впровадженого атома, і взаємодію впроваджених атомів, не лише з найближчими сусідніми атомами, але і з атомами в наступних координаційних сферах, і, нарешті, взаємодію розчинених атомів між собою.

При порівнянні теорії з експериментом слід мати на увазі можливість утворення в сплаві антифаз, а також різних фаз за змістом розчинених атомів (що виникають за рахунок прояву взаємодії між розчиненими атомами), які відрізнятимуться не лише концентрацією розчинених атомів, але і величиною параметра решітки і мірою впорядкованості. Наявність останніх помітно збільшує розчинність. Крім того, викладені у статті результати справедливі для сплавів, у яких впорядкування зменшує параметр решітки. Проте не можна унеможливити збільшення параметра решітки з впорядкуванням, що змінить характер впливу об'ємних ефектів і усебічного тиску на розчинність в упорядкованих сплавах.

Висновки

Огляд широкого спектру металів і сплавів дозволяє зробити висновок, що знання параметрів розчинності домішок дозволяє в майбутньому оцінити і передбачити багато фізичних характеристик багатокомпонентних сплавів.

Основні висновки оглядової науково-дослідної роботи:

- Атомне впорядкування в сплаві AB може, як сприяти розчиненню в нім компонента C , так і ускладнювати розчинення. Розрахунок розчинності для упорядкованих сплавів з ГЦУ структурою типу AB ;
- Впорядкування зменшує розчинність атомів C до нуля для сплаву AB при параметрі $\chi \rightarrow \pm 1$ (це може бути при ступені дальнього порядку $\eta \rightarrow 1$). Тобто в повністю впорядкованому сплаві розчинність ускладнена, отже, щоб розчинити атоми C в сплаві AB , потрібно зменшити η і підвищити температуру.
- У сплавах типу $CuZn$ розчинність сильно збільшується зі збільшенням впорядкування системи.
- Формула (15) вказує на те, що впорядкування сприяє збільшенню розчинності атомів C , що можна пояснити перерозподілом атомів C на вузлах першого і другого типу.
- Встановлено, що формули (9), (10), (12) і (15) справедливі при статичному розподілі атомів в сплаві. Крім того, в цих формулах енергії парної взаємодії атомів вважаються постійними.
- Аналіз типових потрійних твердих розчинів показує, що їх не можна розглядати, як системи із статичним розподілом атомів. Присутній істотний вплив на кількісне співвідношення фаз і тому на загальну побудову потрійної діаграми чинить взаємодія атомів компонентів сплаву.
- Необхідно враховувати залежності міжатомної взаємодії від складу і атомного порядку при дослідженні розчинності в сплавах.

- Відносна розчинність, як функція ступеня дальнього порядку (η), зменшується там, де вона більше одиниці (>1), і збільшується там, де вона менше одиниці (<1).
- Встановлено, що об'ємні ефекти сильно змінюють величину ступеня дальнього порядку (η) в сплаві.
- Вивчення розчинності в сплавах з ГЦК структурою і октаедричними порами впровадження показала, що при додатніх значеннях параметра χ за рахунок об'ємних ефектів може статися значне зменшення (більше, ніж в два рази) розчинності, а при від'ємних χ - збільшення приблизно в півтора рази. Що пояснює збільшення впорядкування в сплавах Ni-Mn і N-Fe при підвищенні розчинності водню.
- Якщо відомий характер впливу тиску на процеси впорядкування і на міжатомну взаємодію, для кожного конкретного сплаву можна передбачити можливі закономірності залежності розчинності від тиску, а отже, передбачити можливу зміну властивостей сплавів під тиском.
- Не можна розглядати сплав просто, як джерело потенціального поля, що діє на ансамбль атомів розчиненого елементу. Оскільки атоми, що розчиняються, видозмінюють це поле, що, у свою чергу, впливає на процеси впорядкування атомів.
- При вивченні процесу впровадження треба враховувати і кореляцію між заповненням вузлів решітки атомами різного сорту, і зміни оточення впровадженого атома в сплаві, і локальне спотворення кристалічної решітки навколо впровадженого атома, і взаємодію впроваджених атомів, не лише з найближчими сусідніми атомами, але і з атомами в наступних координаційних сферах, і, нарешті, взаємодію розчинених атомів між собою.

Розглянуті сплави і метали можна використати, як робоче тіло у накопичувачах водню, що дозволить безпечно зберігати і транспортувати водень для водневої енергетики.

Література

1. *Baglyuk, G.A., Ivasyshyn, O.M., Stasyuk, O.O., Savvak, D.G.* Sintered metals and alloys: The effect of charge component composition on the structure and properties of titanium matrix sintered composites with high-modulus compounds // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2017. – V. 56, No 1-2. – P. 59–68.
2. *Brodnikovskii D.N., Lugovoi N.I., Brodnikovskii N.P., Slyunyaev V.N., Kuz'menko N.N., Vasil'ev A.D., Firstov S.A.* Powder metallurgy production of Ti–5.4 wt.% Si Alloy. II. Structure and Strength of the Sintered Material // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2014. – V.52. – P. 539–544.
3. *Abdullin K.A., Gabdullin M.T., Gritsenko L.V., Ismailov D.V., Kalkozova Z.K., Kumekov S.E., Mukash Z.O., Sazonov A.Y., Terukov E.I.* Electrical, optical, and photoluminescence properties of ZnO films subjected to thermal annealing and treatment in hydrogen plasma // Semiconductors. – 2016. – V.50, No 8. – P.1010–1014.
4. *Baglyuk G.A., Sosnovskii L.A., Volfman V.I.* Effect of carbon content on the properties of sintered steels doped with manganese and copper // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2011. – V. 50, No (3-4). – 189–193.
5. *Matvienko Y., Rud A., Polishchuk S., Zagorodniy Y., Rud N., Trachevski V.* Effect of graphite additives on solid-state reactions in eutectic Al–Cu powder mixtures during high-energy ball milling // Applied Nanoscience. – 2020. – V. 10, No 8. – P. 2803–2811.
6. *Baglyuk G.A., Tolochin A.I., Tolochina A.V., Yakovenko R.V., Gripachevskii A.N., Golovkova M.E.* Effect of Process Conditions on the Structure and Properties of the Hot-

- Forged Fe₃Al Intermetallic Alloy // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2016. – V.55, No (5-6). – P. 297–305.
7. *Havryliuk O.O., Semchuk O.Y.* Formation of periodic structures on the solid surface under laser irradiation // Ukrainian Journal of Physics. – 2017. – V.62, No 1. – P. 20–32
 8. *Khomenko E.V., Baglyuk G.A., Minakova R.V.* Effect of deformation processing on the properties of Cu-50% Cr composite // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2009. – V. 48, No 3-4. – P. 211–215.
 9. *Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Zabrodina I.K., Root L.O., Ismailov D.V.* Measuring the changes in copper nanopowder conductivity during heating as a method for diagnosing its thermal stability // Key Engineering Materials. – 2018. – V. 769. – P. 146–151.
 10. *Sizonenko O.N., Baglyuk G.A., Taftai E.I., Zaichenko A.D., Lipyanyan E.V., Torpakov A.S., Zhdanov A.A., Pristash N.S.* Dispersion and carburization of titanium powders by electric discharge // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2013. – V. 52, No 5-6. – P. 247–253.
 11. *Baglyuk G.A., Napara-Volgina S.G., Vol'fman V.I., Mamonova A.A., Pyatachuk S.G.* Thermal synthesis of Fe-B 4C powder master alloys // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2009. – V. 48, No 7-8. – P. 381–383.
 12. *Gun'ko V.M., Turov V.V., Pakhlov E.M., Matkovsky A.K., Krupska T.V., Kartel M.T., Charmas B.* Blends of amorphous/crystalline nanoalumina and hydrophobic amorphous nanosilica // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2018. – V. 500. – P. 351–358.
 13. *Brodnikovska I., Khomenkova L., Korsunska N., Polishchuk Yu., Brychevskiy M., Brodnikovskiy Ye., Brodnikovskiy D., Polishko I., Vasylyev O.* The investigation of 10Sc1CeSZ structure transformation and ionic conductivity // Materials Today: Proceedings. – 2022. – V.50, No 1. – P. 487–491.
 14. *Biliuk A.A., Semchuk O.Y., Havryliuk O.O.* Width of the surface plasmon resonance line in spherical metal nanoparticles // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2020. – V. 23, No 3. – P. 308–315.
 15. *Baglyuk G.A., Terekhov V.N., Ternovoi Y.F.* Structure and properties of powder austenitic die steels // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2006. – V. 45, No 7-8. – P. 317–320.
 16. *Brodnikovska I., Korsunska N., Khomenkova L., Polishchuk Yu., Lavoryk S, Brychevskiy M., Brodnikovskiy Y., Vasylyev O.* Grains, grain boundaries and total ionic conductivity of 10Sc1CeSZ and 8YSZ solid electrolytes affected by crystalline structure and dopant content // Materials Today: Proceedings. – 2019. – V.6, No 2. – P. 79–85.
 17. *Nastasiienko N., Palianytsia B., Kartel M., Larsson M., Kulik T.* Thermal transformation of caffeic acid on the nanocerium surface studied by temperature programmed desorption mass-spectrometry, thermogravimetric analysis and ft-ir spectroscopy // Colloids and Interfaces. – 2019. – V. 3, No 1. – P. 34.
 18. *Tolochyn O.I., Baglyuk G.A., Tolochyna O.V., Evyeh Y.I., Podrezov Y.M., Molchanovska H.M.* Structure and Physicomechanical Properties of the Fe₃Al Intermetallic Compound Obtained by Impact Hot Compaction // Materials Science. – 2021. – V. 56, No 4. – P. 499–508.
 19. *Semchuk O.Y., Biliuk A.A., Havryliuk O.O.* The Kinetic Theory of the Width of Surface Plasmon Resonance Line in Metal Nanoparticles // Springer Proceedings in Physics. – 2021. – V. 264. – P. 3–10.
 20. *Brodnikovskii D.N., Lugovoi N.I., Brodnikovskii N.P., Slyunyaev V.N., Kulak L.D., Vasil'ev A.D., Firstov S.A.* Powder metallurgy production of Ti–5.4 wt.% Si alloy. I. Simulating the formation of powder particles by centrifugal atomization // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2013. – V.52. – P. 409–416.

21. *Biliuk A.A., Semchuk O.Y., Havryliuk O.O.* Kinetic theory of absorption of ultrashort laser pulses by ensembles of metallic nanoparticles under conditions of surface plasmon resonance // *Himia, Fizika ta Tehnologija Poverhni.* – 2022. – V.13, No 2. – P. 556–559.
22. *Ilyin A.P., Mostovshchikov A.V., Root L.O., Zmanovskiy S.V., Ismailov D.V., Ruzieva G.U.* Effect of beta-radiation exposure on the parameters of aluminum micropowders activity // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering.* – 2019. – V. 330, No 8. – P. 87–93.
23. *Karachevtseva L., Kartel M., Kladko V., Gudymenko O., Bo W., Bratus V., Lytvynenko O., Onyshchenko V., Stronska O.* Functionalization of 2D macroporous silicon under the high-pressure oxidation // *Applied Surface Science.* – 2018. – V. 434. – P. 142–147.
24. *Brodnikovska I., Brychevskiy M., Brodnikovskiy Y., Brodnikovskiy D., Vasylyev O., Smirnova A.* Joint impedance spectroscopy and fractography data analysis of ceria doped scandia stabilized zirconia solid electrolyte modified by powder types and sintering temperature // *French-Ukrainian Journal of Chemistry.* – 2018. – V. 6, No 1. – P. 128–141.
25. *Baglyuk G.A., Poznyak L.A.* The sintering of powder metallurgy high-speed steel with activating additions // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.* – 2002. – V. 41, No 7-8. – P. 366–368.
26. *Brodnikovskiy D.N., Golovash A.V., Tkachenko S.V., Okun I.Yu., Kuz'menko N.N., Firstov S.A.* Influence of rigid particles of silicide on character of deformation of alloys on the base of a titanium at the high temperatures // *Metallofizika i noveishie tekhnologii.* – 2006. – V. 28. – P. 165–174.
27. *Baglyuk G.A., Poznyak L.A.* Sintered wear-resistant iron-based materials. I. Materials fabricated by sintering and impregnation // *Poroshkovaya Metallurgiya.* – 2001. – V. 1-2. – P. 44–53.
28. *Zaginaichenko S.Y., Lysenko E.A., Golovchenko T.N., Javadov N.F.* The forming peculiarities of C₆₀ molecule // *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security.* – 2008. – PartF2. – P. 53–65.
29. *Золотаренко Ол.Д., Рудакова О.П., Аханова Н.Е., Золотаренко Ан.Д., Щур Д.В., Матисіна З.А., Габдуллин М.Т., Уалханова М., Гаврилюк Н.А., Золотаренко О.Д., Чимбай М.В., Загорулько І.В.* Порівняльний аналіз продуктів синтезу фуллеренів і вуглецевих наноструктур при використанні графіту марки ЕГСП та МПГ-7 // *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології.* – 2022. – Т. 20, № 3. – С. 725–744.
30. *Gun'ko V.M., Turov V.V., Zarko V.I., Prykhod'Ko G.P., Krupskaya T.V., Golovan A.P., Skubiszewska-Zięba J., Charmas B., Kartel M.T.* Unusual interfacial phenomena at a surface of fullerite and carbon nanotubes // *Chemical Physics.* – 2015. – V. 459. – P. 172–185.
31. *Nishchenko M.M., Likhtorovich S.P., Dubovoy A.G., Rashevskaya T.A.* Positron annihilation in C₆₀ fullerites and fullerene-like nanovoids // *Carbon.* – 2003. – V. 41, No 7. – P. 1381–1385.
32. *Lad'yanov V.I., Nikonova R.M., Larionova N.S., Aksenova V.V., Mukhgalin V.V., Rud' A.D.* Deformation-induced changes in the structure of fullerites C_{60/70} during their mechanical activation // *Physics of the Solid State.* – 2013. – V. 55, No 6. – P. 1319–1324.
33. *Matysina Z. A., Zolotarenko Ol. D., Rudakova O. P., Akhanova N. Y., Pomytkin A. P., Zolotarenko An. D., Shchur D. V., Gabdullin M. T., Ualkhanova M., Gavrylyuk N. A., Zolotarenko A. D., Chymbai M. V., Zagorulko I. V.* Iron in Endometallofullerenes // *Prog. Phys. Met.* – 2022. – V. 23, No. 3. – P. 510–527.
34. *Kartel M.T., Voitko K.V., Grebelna Y.V., Zhuravskiy S.V., Ivanenko K.O., Kulyk T.V., Makhno S.M., Sementsov Y.I.* Changes in the structure and properties of graphene oxide

- surfaces during reduction and modification // *Himia, Fizika ta Tehnologia Poverhni*. – 2022. – V.13, No 2. – P. 179–189.
35. *Rud A.D., Kiryan I.M.* Quantitative analysis of the local atomic structure in disordered carbon // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2014. – V. 386. – P. 1–7.
 36. *Sementsov Yu.I., Cherniuk O.A., Zhuravskiy S.V., Bo W., Voitko K.V., Bakalinska O.M., Kartel M.T.* Synthesis and catalytic properties of nitrogen-containing carbon nanotubes // *Himia, Fizika ta Tehnologia Poverhni*. – 2021. – V. 12, No 2. – P. 135–143.
 37. *Barany S., Kartel' N., Meszaros R.* Electrokinetic potential of multilayer carbon nanotubes in aqueous solutions of electrolytes and surfactants // *Colloid Journal*. – 2014. – V. 76, No 5. – P. 509–513.
 38. *Schur D.V., Dubovoy A.G., Zaginaichenko S.Yu., Adejev V.M., Kotko A.V., Bogolepov V.A., Savenko A.F., Zolotarenko A.D., Firstov S.A., Skorokhod V.V.* Synthesis of carbon nanostructures in gaseous and liquid medium // *NATO Security through Science Series A: Chemistry and Biology*. – 2007. – P. 199–212.
 39. *Zaginaichenko S.Y., Matysina Z.A.* The peculiarities of carbon interaction with catalysts during the synthesis of carbon nanomaterials // *Carbon*. – 2003. – V. 41, No 7. – P. 1349–1355.
 40. *Boguslavskii L.Z., Rud' A.D., Kir'yan I.M., Nazarova N.S., Vinnichenko D.V.* Properties of carbon nanomaterials produced from gaseous raw materials using high-frequency electrodischarge processing // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2015. – V.51, No 2. – P. 105–110.
 41. *Matysina Z. A., Zolotarenko Ol. D., Ualkhanova M., Rudakova O. P., Akhanova N. Y., Zolotarenko An. D., Shchur D. V., Gabdullin M. T., Gavrylyuk N. A., Zolotarenko O.D., Chymbai M. V., Zagorulko I. V.* Electric Arc Methods to Synthesize Carbon Nanostructures // *Prog. Phys. Met.* 2022. – 23, No. 3. – P. 528–559.
 42. *Yakymchuk O.M., Perepelytsina O.M., Rud A.D., Kirian I.M., Sydorenko M.V.* Impact of carbon nanomaterials on the formation of multicellular spheroids by tumor cells // *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*. – 2014. – V. 211, No 12. – P. 2778–2784.
 43. *Kartel N.T., Gerasimenko N.V., Tsyba N.N., Nikolaichuk A.D., Kovtun G.A.* Synthesis and study of carbon sorbent prepared from polyethylene terephthalate // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2001. – V. 74, No 10. – P. 1765–1767.
 44. *Zolotarenko Ol. D, Ualkhanova M.N., Rudakova E.P., Akhanova N.Y., Zolotarenko An. D., Shchur D.V., Gabdullin M.T., Gavrylyuk N.A., Zolotarenko A.D., Chymbai M.V., Zagorulko I.V., Havryliuk O.O.* Advantages and disadvantages of electric arc methods for the synthesis of carbon nanostructures // *Himia, Fizika ta Tehnologia Poverhni*. – 2022. – V. 13, No 2. – P. 209. [in Ukrainian].
 45. *Oreshkin V.I., Chaikovskii S.A., Labetskaya N.A., Ivanov Y.F., Khishchenko K.V., Levashov P.R., Kuskova N.I., Rud' A.D.* Phase transformations of carbon under extreme energy action // *Technical Physics*. – 2012. – V. 57, No 2. – P. 198–202.
 46. *Rud A.D., Lakhnik A.M., Mikhailova S.S., Karban O.V., Surnin D.V., Gilmuddinov F.Z.* Structure of Mg-C nanocomposites produced by mechano-chemical synthesis // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2011. – V.509 (SUPPL. 2) . – P. S592–S594.
 47. *Zolotarenko O. D., Rudakova E. P., Zolotarenko A. D., Akhanova N. Y., Ualkhanova M. N., Shchur D. V., Gabdullin M. T., Gavrylyuk N. A., Myronenko T. V., Zolotarenko A. D., Chymbai M. V., Zagorulko I.V., Tarasenko Yu. O., Havryliuk O. O.* Platinum-containing carbon nanostructures for the creation of electrically conductive ceramics using 3D printing of CJP technology // *Himia, Fizika ta Tehnologia Poverhni*. – 2022. – V. 13, No 3. – P. 259 – 273. [in Ukrainian].

48. *Zolotareno O.I.D., Rudakova E.P., Akhanova N.Y., Zolotareno An.D., Shchur D.V., Gabdullin M.T., Ualkhanova M., Sultangazina M., Gavrylyuk N.A., Chymbai M.V., Zolotareno A.D., Zagorulko I.V., Tarasenko Yu.O.* Plasmochemical Synthesis of Platinum-Containing Carbon Nanostructures Suitable for CJP 3D-Printing // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* – 2022. – V. 44, No 3. – P. 343.
49. *Zolotareno O.I.D., Rudakova E.P., Akhanova N.Y., Zolotareno An.D., Shchur D.V., Gabdullin M.T., Ualkhanova M., Gavrylyuk N.A., Chymbai M.V., Myronenko T.V., Zagorulko I.V., Zolotareno A.D., Havryliuk O.O.* Electrically conductive composites based on TiO₂ and carbon nanostructures manufactured using 3D printing of CJP technology // *Himia, Fizika ta Tehnologija Poverhni.* – 2022. – V.13, No 4. – P. 415–424.
50. *Zolotareno O.I.D., Rudakova E.P., Akhanova N.Y., Zolotareno An.D., Shchur D.V., Gabdullin M.T., Ualkhanova M., Gavrylyuk N.A., Chymbai M.V., Yu.O. Tarasenko, Zagorulko I.V., Zolotareno A.D.* Electric Conductive Composites Based on Metal Oxides and Carbon Nanostructures // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* – 2021. – V. 43, No 10. – P. 1417—1430. [in Ukrainian]
51. *Pylypova O., Havryliuk O., Antonin S., Evtukh A., Skryshevsky V., Ivanov I., Shmahlii S.* Influence of nanostructure geometry on light trapping in solar cells // *Applied Nanoscience.* – 2022. – V.12, No 3. – P. 769–774.
52. *Semchuk O.Y., Biliuk A.A., Havryliuk O.O., Biliuk A.I.* Kinetic theory of electroconductivity of metal nanoparticles in the condition of surface plasmon resonance // *Applied Surface Science Advances.* – 2021. – V. 3. – P. 100057.
53. *Havryliuk O.O., Evtukh A.A., Pylypova O.V., Semchuk O.Y., Ivanov I.I., Zabolotnyi V.F.* Plasmonic enhancement of light to improve the parameters of solar cells // *Applied Nanoscience.* – 2020. – V.10, No 12. – P. 4759–4766.
54. *Stavitskaya S.S., Mironyuk T.I., Kartel' N.T., Strelko V.V.* Sorption characteristics of "food fibers" in secondary products of processing of vegetable raw materials // *Russian Journal of Applied Chemistry.* – 2001. – V. 74, No 4. – P. 592–595.
55. *Gun'ko V.M., Turov V.V., Krupska T.V., Pakhlov E.M.* Behavior of water and methane bound to hydrophilic and hydrophobic nanosilicas and their mixture // *Chemical Physics Letters.* – 2017. – V. 690. – P. 25–30.
56. *Zakutevskii O.I., Psareva T.S., Strelko V.V., Kartel' N.T.* Sorption of U(VI) from aqueous solutions with carbon sorbents // *Radiochemistry.* – 2007. – V. 49, No 1. – P. 67–71.
57. *Protsak I., Gun'ko V.M., Turov V.V., Krupska T.V., Pakhlov E.M., Zhang D., Dong W., Le Z.* Nanostructured polymethylsiloxane/fumed silica blends // *Materials.* – 2019. – V.12, No 15. – P. 2409.
58. *Kartel M., Galysh V.* New composite sorbents for caesium and strontium ions sorption // *Chemistry Journal of Moldova* 2017. – V. 12, No 1. – P. 37–44.
59. *Gun'ko V.M., Turov V.V., Protsak I.S., Krupska T.V., Pakhlov E.M., Tsapko M.D.* Effects of pre-adsorbed water on methane adsorption onto blends with hydrophobic and hydrophilic nanosilicas // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* – 2019. – V.570. – P. 471–480.
60. *Galysh V., Sevastyanova O., Kartel M., Lindström M.E., Gornikov Y.* Impact of ferrocyanide salts on the thermo-oxidative degradation of lignocellulosic sorbents // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* – 2017. – V. 128, No 2. – P. 1019–1025.
61. *Turov V.V., Gun'ko V.M., Krupska T.V., Borysenko M.V., Kartel M.T.* Interfacial behavior of polar and nonpolar frozen/unfrozen liquids interacting with hydrophilic and hydrophobic nanosilicas alone and in blends // *Journal of Colloid and Interface Science.* – 2021. – V. 588. – P. 70–83.
62. *Gabdullin M.T., Khamitova K.K., Ismailov D.V., Sultangazina M.N., Kerimbekov D.S., Yegemova S.S., Chernoshtan A., Schur D.V.* Use of nanostructured materials for the

- sorption of heavy metals ions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – V. 511, No 1. – P. 12044.
63. *Sementsov Yu.I., Prikhod'Ko G.P., Melezhik A.V., Aleksyeyeva T.A., Kartel M.T.* Physicochemical properties and biocompatibility of polymer/carbon nanotubes composites // *Nanomaterials and Supramolecular Structures: Physics, Chemistry, and Applications.* – 2010. – P. 347–368.
 64. *Gun'ko V.M., Lupascu T., Krupska T.V., Golovan A.P., Pakhlov E.M., Turov V.V.* Influence of tannin on aqueous layers at a surface of hydrophilic and hydrophobic nanosilicas // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* – 2017. – V. 531. – P. 9–17.
 65. *Khamitova K.K., Kayupov B.A., Yegemova S.S., Gabdullin M.T., Abdullin Kh.A., Ismailov D.V., Kerimbekov D.S.* The use of fullerenes as a biologically active molecule // *International Journal of Nanotechnology.* – 2019. – V. 16, No 1-3. – P. 100–108.
 66. *Gun'ko V.M., Turov V.V., Krupska T.V., Tsapko M.D.* Interactions of human serum albumin with doxorubicin in different media // *Chemical Physics.* – 2017. – V. 483-484. – P. 26–34.
 67. *Gun'ko V.M., Turov V.V., Krupska T.V., Protsak I.S., Borysenko M.V., Pakhlov E.M.* Polymethylsiloxane alone and in composition with nanosilica under various conditions // *Journal of Colloid and Interface Science.* – 2019. – V.541. – P. 213–225.
 68. *Krupska T.V., Turova A.A., Un'Ko V.M., Turov V.V.* Influence of highly dispersed materials on physiological activity of yeast cells // *Biopolymers and Cell.* – 2009. – V. 25, No 4. – P. 290–296.
 69. *Tkachenko S., Brodnikovskiyi D., Cizek J. Komarov P., Brodnikovskiyi Ye., Tymoshenko Ya., Csaki S., Pinchuk M., Vasylyev O., Čelko L., Gadzyra M., Chraska T.* Novel Ti–Si–C composites for SOFC interconnect materials: Production optimization // *Ceramics International.* – 2022. – V. 48, No19(A). – P. 27785–27798.
 70. *Podhurska V., Brodnikovskiyi D., Vasylyv B., Gadzyra M., Tkachenko S., Čelko L., Ostash O., Brodnikovska I., Brodnikovskiyi Ye., Vasylyev O.* Ti-Si-C in-situ composite as a potential material for lightweight SOFC interconnects. Promising materials and processes in applied electrochemistry. – Kyiv : KNUVD. – 2020. – P. 54-69.
 71. *Brodnikovskiyi Y., McDonald N., Polishko I., Brodnikovskiyi D., Brodnikovska I., Brychevskiyi M., Kovalenko L., Vasylyev O., Belous A., Steinberger-Wilckens R.* Properties of 10Sc1CeSZ-3.5 YSZ (33-, 40-, 50-wt.%) composite ceramics for SOFC application // *Materials Today: Proceedings.* – 2019. – V. 6. – P. 26–35.
 72. *Polishko I., Ivanchenko S., Horda R., Brodnikovskiyi Ye., Lysunencko N., Kovalenko L.* Tape casted SOFC based on Ukrainian 8YSZ powder // *Materials Today: Proceedings.* – 2019. – V. 6, No 2. – P. 237–241.
 73. *Savenko A.F., Bogolepov V.A., Meleshevich K.A., Zaginaichenko S.Yu., Lototsky M.V., Pishuk V.K., Teslenko L.O., Skorokhod V.V.* Structural and methodical features of the installation for the investigations of hydrogen-sorption characteristics of carbon nanomaterials and their composites // *NATO Security through Science Series A: Chemistry and Biology.* – 2007. – P. 365–382.
 74. *Zaginaichenko S., Nejat Veziroglu T.* Peculiarities of hydrogenation of pentatomic carbon molecules in the frame of fullerene molecule C₆₀ // *International Journal of Hydrogen Energy.* – 2008. – V. 33, No 13. – P. 3330–3345.
 75. *Zaginaichenko S.Yu., Veziroglu T.N., Lototsky M.V., Bogolepov V.A., Savenko A.F.* Experimental set-up for investigations of hydrogen-sorption characteristics of carbon nanomaterials // *International Journal of Hydrogen Energy.* – 2016. – V. 41, No 1. – P. 401–406.

76. *Lakhnik A.M., Kirian I.M., Rud A.D.* The Mg/MAX-phase composite for hydrogen storage // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2022. – V.47, No 11. – P. 7274–7280.
77. *Schur D.V., Zaginaichenko S.Y., Savenko A.F., Bogolepov V.A., Anikina N.S., Zolotareno A.D., Matysina Z.A., Veziroglu T.N., Skryabina N.E.* Hydrogenation of fullerite C₆₀ in gaseous phase // *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. – 2011. – V. 2. – P. 87–105.
78. *Bogolepov V.A., Veziroglu A., Zaginaichenko S.Y., Savenko A.F., Meleshevich K.A.* Selection of the hydrogen-sorbing material for hydrogen accumulators // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – V. 41, No 3. – P. 1811–1818.
79. *Shchur D.V., Zaginaichenko S.Y., Veziroglu A., Veziroglu T.N., Gavrylyuk N.A., Zolotareno A.D., Gabdullin M.T., Ramazanov T.S., Zolotareno A.D., Zolotareno A.D.* Prospects of Producing Hydrogen-Ammonia Fuel Based on Lithium Aluminum Amide // *Russian Physics Journal*. – 2021. – V. 64, No 1. – P. 89–103.
80. *Matysina Z.A.* Phase transformations $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma \rightarrow \delta \rightarrow \varepsilon$ in titanium hydride tihx with increase in hydrogen concentration // *Russian Physics Journal*. – 2001. – V. 44, No 11. – P. 1237–1243.
81. *Trefilov V.I., Pishuk V.K., Zaginaichenko S.Yu., Choba A.V., Nagornaya N.R.* Solar furnaces for scientific and technological investigation // *Renewable energy*. – 1999. – V.16, No 1-4. – P. 757–760.
82. *Lyashenko A.A., Adejev V.M., Voitovich V.B., Zaginaichenko S.Yu.* Niobium as a construction material for a hydrogen energy system // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 1995. – V. 20, No 5. – P. 405–407.
83. *Lavrenko V.A., Adejev V.M., Kirjakova I.E.* Studies of the hydride formation mechanism in metals // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 1994. – V. 19, No 3. – P. 265–268.
84. *Matysina Z.A., Gavrylyuk N.A., Kartel M., Veziroglu A., Veziroglu T.N., Pomytkin A.P., Schur D.V., Ramazanov T.S., Gabdullin M.T., Zolotareno A.D., Zolotareno A.D., Shvachko N.A.* Hydrogen sorption properties of new magnesium intermetallic compounds with MgSnCu₄ type structure // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2021. – V. 46, No 50. – P. 25520–25532.
85. *Matysina Z.A., Pogorelova O.S., Zaginaichenko S.Yu.* The surface energy of crystalline CuZn and FeAl alloys // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 1995. – V. 56, No. 1. – P. 9.
86. *Rud A.D., Schmidt U., Zelinska G.M., Lakhnik A.M., Kolbasov G.Ya., Danilov M.O.* Atomic structure and hydrogen storage properties of amorphous-quasicrystalline Zr-Cu-Ni-Al melt-spun ribbons // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2007. – V. 353, No 32-40. – P. 3434–3438.
87. *Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Yu.* Hydrogen solubility in alloys under pressure // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 1996. – V. 21, No 11-12. – P. 1085.
88. *Zaginaichenko S.Yu., Matysina Z.A., Smityukh I., Pishuk V.K.* Hydrogen in lanthan-nickel storage alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2002. – V. 330-332. – P. 70–75.
89. *Lytvynenko Yu.M.* Utilization the concentrated solar energy for process of deformation of sheet metal // *Renewable Energy*. – 1999. – V.16, No 1-4. – P. 753–756.
90. *Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Y.* Sorption Properties of Iron–Magnesium and Nickel–Magnesium Mg₂FeH₆ and Mg₂NiH₄ Hydrides // *Russian Physics Journal*. – 2016. – V. 59, No 2. – P. 177–189.
91. *Rud A.D., Schmidt U., Zelinska G.M., Lakhnik A.M., Perekos A.E., Kolbasov G.Ya., Danilov M.O.* Peculiarities of structural state and hydrogen storage properties of Ti-Zr-Ni based intermetallic compounds // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2005. – V. 404-406 (SPEC. ISS.). – P. 515–518.
92. *Zaginaichenko S.Y., Matysina Z.A., Teslenko L.O., Veziroglu A.* The structural vacancies in

- palladium hydride. Phase diagram // International Journal of Hydrogen Energy. – 2011. – V. 36, No 1. – P. 1152–1158.
93. *Zaginaichenko S.Y., Zaritskii D.A., Matysina Z.A., Veziroglu T.N., Kopylova L.I.* Theoretical study of hydrogen-sorption properties of lithium and magnesium borocarbides // International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – V. 40, No 24. – P. 7644–7651.
 94. *Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Y.* Hydrogen-sorption properties of magnesium and its intermetallics with Ca₇Ge-Type structure // Physics of Metals and Metallography. – 2013. – V. 114, No 4. – P. 308–321.
 95. *Tikhotskii S.A., Fokin I.V.* Traveltime seismic tomography with adaptive wavelet parameterization // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. – 2011. – V. 47, No 4. – P. 327.
 96. *Ushakova L.M., Ivanenko K.I., Sigareva N.V., Terets M.I., Kartel M.T., Sementsov Yu.I.* Influence of nanofiller on the structure and properties of macromolecular compounds // Physics and Chemistry of Solid State. – 2022. – V. 23, No 2. – P. 394–400.
 97. *Sementsov Y., Prikhod'ko G., Kartel M., Tsebrenko M., Aleksyeyeva T., Ulyanchychi N.* Carbon nanotubes filled composite materials // NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. – 2011. – V. 2. – P. 183–195.
 98. *Harea E., Stoček R., Storozhuk L., Sementsov Y., Kartel N.* Study of tribological properties of natural rubber containing carbon nanotubes and carbon black as hybrid fillers // Applied Nanoscience. – 2019. – V.9, No 5. – P. 899–906.
 99. *Gun'ko V.M., Turov V.V., Protsak I., Krupskaya T.V., Pakhlov E.M., Zhang D.* Interfacial phenomena in composites with nanostructured succinic acid bound to hydrophilic and hydrophobic nanosilicas // Colloids and Interface Science Communications. – 2020. – V. 35. – P. 100251.
 100. *Курнаков Н.С.* Введение в физико-химический анализ. – М.–Л.: Изд. АН СССР. – 1940.
 101. *Смителлс К.* Газы и металлы. – М.–Л.: Metallurgizdat. – 1940.
 102. *Даркен Л.С., Гурри Р.В.* Физическая химия металлов. – М.: Metallurgizdat. – 1960.
 103. *Выходец В.Б., Гольцов В.А., Гельд П.В.* Диффузия водорода в сплаве Cu₉Pd // ФММ. – 1968. – Т. 26, № 5. – С. 933–935.
 104. *Гольцов В.А., Выходец В.Б., Гельд П.В., Крылова Т.А.* Диффузия, проницаемость и растворимость водорода в сплавах СизАи // ФММ. – 1970. – Т. 30, № 3. – С. 657.
 105. *Выходец В.Б., Гольцов В.А., Гельд П.В.* // УФЖ. – 1970. – Т.15. С. 107.
 106. *Выходец В.Б., Гольцов В.А., Гельд П.В.* К теории диффузии водорода в упорядочивающихся сплавах типа Cu/Au. – ФТТ. – 1970. – Т. 12, № 9. – С. 2692–2697.
 107. *Попов А.А.* Проблемы металловедения и термической обработки. – М.: Машгиз. – 1960.
 108. *Корнилов И.И.* // Изв. АН СССР. – 1947. – Т. 4. –С. 337.
 109. *Büchle H.* // Rev Met. – 1957. – V.54. – P. 9.
 110. *Зеленков И.А., Мартыничук Е.Н.* // Металлофизика. – 1974. – № 50.
 111. *Borelius* // Ann. d. Physik. – 1927. – V. 83. – P. 121.
 112. *Wegard L.* // Zeit. f. Pliysik. – 1921. – V. 5. – P. 17.
 113. *Wegard L.* // Zeit. f. Kristall. – 1928. – V. 67. – P. 148.
 114. *Stockdale D.* // J. Inst. Metals. – 1940. – V. 66. – P. 287.
 115. *Kirkendahl E.O.* // Trans. AIME. – 1942. – V. 147. – P. 104.
 116. *Owen E.A.* // J. Inst. Metals. – 1947. – V. 73. – P. 471.
 117. *Axon H., Hume-Rothery W.* // Proc. Roy. Soc. – 1948. – V. A193. – P. 1.
 118. *Raynor G.V.* // Trans. Faraday. Soc. – 1949. – V. 45. – P. 698.
 119. *Friedel J.* // Phil. Mag. – 1955. – V. 7, No 46. – P. 514.
 120. *Eshelby J.D.* // Solid State Physic. – 1959. – V. 3. – P. 79.

121. *Warren B., Averbach B., Roberts B.J.* // *Appl. Phys.* – 1951. – V. 22. – P. 1493.
122. *Bradley A.I., Jay A.H.* // *Iron. Steel Inst.* – 1932. – V. 125. – P. 339.
123. *Gordy W.* // *Phys. Rev.* – 1946. – V. 69. – P. 604.
124. *Погодин С.А., Михеева В.И.* // *Изв. СФХА.* – 1941. – Т. 14. – С. 283.
125. *Кузнецов В.Г.* // *Изв. СФХА.* – 1946. – Т. 16. – С. 232.
126. *Сивертсен Д.М., Никольсон М.Е.* Структура и свойства твердых растворов. – М.: «Металлургия». – 1964.
127. *Nicholas J.* // *Proc. Phys. Soc.* – 1953. – V. A66. – P. 201.
128. *Huang K.* // *Proc. Roy. Soc.* – 1947. – V. A190. – P. 102.
129. *Уманский Я.С., Финкельштейн Б.Н., Блантер М.Е., Кишкин С.Т., Фастов Н.С., Горелик С.С.* Физические основы металловедения. – М.: Metallurgizdat. – 1955.
130. *Ландау Л., Лифшиц Е.* Статистическая физика. – М.–Л. – 1940. – 586 с.
131. *Кривоглаз М.А.* // *ЖТФ.* – 1954. – Т. 24. – С.1077.
132. *Кривоглаз М.А.* // *ФММ.* – 1955. – Т. 1. – С. 393.
133. *Агеев Н.В.* // *ЖНХ АН СССР.* – 1958. – Т. 3. – С. 557.
134. *Немилов В.А., Видусова Т.А.* // *ИОНХ АН СССР. Изв. сект, платины.* – 1940. – Т. 17. – С. 11.
135. *Агеев В.В.* Химия металлических сплавов. – М.: Изд. АН СССР. – 1941.
136. *Михеева В.И.* // *Изв. АН СССР, ОХН.* – 1944. – Т. 6. – С. 396.
137. *Вульф Б.К.* // *ФММ.* – 1956. – Т. 3. – С. 97.
138. *Юм-Розери В., Рейнор Г.В.* Структура металлов и сплавов. – М.: Metallurgizdat. – 1959.
139. *Вульф Б.К.* // *Успехи химии.* – 1960. – Т. 29. – С. 774.
140. *Бокий Г.Б., Вульф Б.К., Смирнова Н.Л.* // *ЖСХ, Изд. АН СССР.* – 1961. – Т. 2, № 1. – С. 74.
141. *Самсонов Г.В.* // *Порошковая металлургия.* – 1962. – 2. – С.3.
142. *Вульф Б.К.* Тройные металлические фазы в сплавах. – М.: «Металлургия». – 1964.
143. *Матысина З.А., Матысина Э.А.* // *УФЖ.* – 1969. – Т. 14. – С. 1643.
144. *Матысина З.А.* // *Изв. вузов СССР, Физика.* – 1971. – Т. 10. – С. 93.
145. *Матысина З.А., Матысина Э.А.* // *УФЖ.* – 1972. – Т. 17. – С. 14.
146. *Матысина З.А.* // *УФЖ.* – 1969. – Т. 14, № 10. – С. 1638.
147. *Матысина З.А.* // *УФЖ.* – 1972. – Т. 17. – С. 9.
148. *Матысина З.А., Смирнов А.А.* // *Вопросы физики металлов и металловедения.* – 1964. – Т. 19. – С. 136.
149. *Матысина З.А., Чернышенко Э.А.* // *Металлофизика.* – 1968. – Т. 20. – С. 75.
150. *Матысина З.А., Матысина Э.А., Чикаренко А.Л.* // *Механизм и кинетика кристаллизации.* – 1973.
151. *Рыжков В.И., Смирнов А.А.* // *ФММ.* – 1964. – Т. 18. – С. 670.
152. *Канюка А.К., Рыжков В.И., Смирнов А.А.* // *Металлофизика.* – 1965. – Т. 3. – С. 22.
153. *Канюка А.К., Смирнов А.А.* // *УФЖ.* – 1969. – Т. 14. – С. 1626.
154. *Рыжков В.И.* // *ДАН УССР, сер. А.* – 1970. – Т. 3. – С. 277.
155. *Гольцов В.А., Гельд П.В., Симаков Ю.П., Штейнберг М.М., Выходец В.А.* // *Диффузионные процессы в металлах.* – 1969. – Т. 17. – С. 92.

References

1. Baglyuk, G.A., Ivasyshyn, O.M., Stasyuk, O.O., Savvakina, D.G. Sintered metals and alloys: The effect of charge component composition on the structure and properties of

- titanium matrix sintered composites with high-modulus compounds. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2017. **56**(1-2): 59.
2. Brodnikovskii D.N., Lugovoi N.I., Brodnikovskii N.P., Slyunyaev V.N., Kuz'menko N.N., Vasil'ev A.D., Firstov S.A. Powder metallurgy production of Ti–5.4 wt.% Si Alloy. II. Structure and Strength of the Sintered Material. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2014. **52**: 539.
 3. Abdullin K.A., Gabdullin M.T., Gritsenko L.V., Ismailov D.V., Kalkozova Z.K., Kumekov S.E., Mukash Z.O., Sazonov A.Y., Terukov E.I. Electrical, optical, and photoluminescence properties of ZnO films subjected to thermal annealing and treatment in hydrogen plasma. *Semiconductors*. 2016. **50**(8): 1010.
 4. Baglyuk G.A., Sosnovskii L.A., Volfman V.I. Effect of carbon content on the properties of sintered steels doped with manganese and copper. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2011. **50**(3-4): 189.
 5. Matvienko Y., Rud A., Polishchuk S., Zagorodniy Y., Rud N., Trachevski V. Effect of graphite additives on solid-state reactions in eutectic Al–Cu powder mixtures during high-energy ball milling. *Applied Nanoscience*. 2020. **10**(8): 2803.
 6. Baglyuk G.A., Tolochin A.I., Tolochina A.V., Yakovenko R.V., Gripachevckii A.N., Golovkova M.E. Effect of Process Conditions on the Structure and Properties of the Hot-Forged Fe₃Al Intermetallic Alloy. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2016. **55**(5-6): 297.
 7. Havryliuk O.O., Semchuk O.Y. Formation of periodic structures on the solid surface under laser irradiation. *Ukrainian Journal of Physics*. 2017. **62**(1): 20.
 8. Khomenko E.V., Baglyuk G.A., Minakova R.V. Effect of deformation processing on the properties of Cu-50% Cr composite. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2009. **48**(3-4): 211.
 9. Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Zabrodina I.K., Root L.O., Ismailov D.V. Measuring the changes in copper nanopowder conductivity during heating as a method for diagnosing its thermal stability. *Key Engineering Materials*. 2018. **769**: 146.
 10. Sizonenko O.N., Baglyuk G.A., Taftai E.I., Zaichenko A.D., Lipyan E.V., Torpakov A.S., Zhdanov A.A., Pristash N.S. Dispersion and carburization of titanium powders by electric discharge. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2013. **52**(5-6): 247.
 11. Baglyuk G.A., Napara-Volgina S.G., Vol'fman V.I., Mamonova A.A., Pyatachuk S.G. Thermal synthesis of Fe-B 4C powder master alloys. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2009. **48**(7-8): 381.
 12. Gun'ko V.M., Turov V.V., Pakhlov E.M., Matkovsky A.K., Krupska T.V., Kartel M.T., Charmas B. Blends of amorphous/crystalline nanoalumina and hydrophobic amorphous nanosilica. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. **500**: 351.
 13. Brodnikovska I., Khomenkova L., Korsunska N., Polishchuk Yu., Brychevskiy M., Brodnikovskiy Ye., Brodnikovskiy D., Polishko I., Vasylyev O. The investigation of 10Sc1CeSZ structure transformation and ionic conductivity. *Materials Today: Proceedings*. 2022. **50**(1): 487.
 14. Biliuk A.A., Semchuk O.Y., Havryliuk O.O. Width of the surface plasmon resonance line in spherical metal nanoparticles. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2020. **23**(3): 308.
 15. Baglyuk G.A., Terekhov V.N., Ternovoi Y.F. Structure and properties of powder austenitic die steels. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2006. **45**(7-8): 317.
 16. Brodnikovska I., Korsunska N., Khomenkova L., Polishchuk Yu., Lavoryk S, Brychevskiy M., Brodnikovskiy Y., Vasylyev O. Grains, grain boundaries and total ionic conductivity of 10Sc1CeSZ and 8YSZ solid electrolytes affected by crystalline structure and dopant content. *Materials Today: Proceedings*. 2019. **6**(2): 79.

17. Nastasiienko N., Palianytsia B., Kartel M., Larsson M., Kulik T. Thermal transformation of caffeic acid on the nanoceria surface studied by temperature programmed desorption mass-spectrometry, thermogravimetric analysis and ft-ir spectroscopy. *Colloids and Interfaces*. 2019. **3**(1): 34.
18. Tolochyn O.I., Baglyuk G.A., Tolochyna O.V., Evych Y.I., Podrezov Y.M., Molchanovska H.M. Structure and Physicomechanical Properties of the Fe₃Al Intermetallic Compound Obtained by Impact Hot Compaction. *Materials Science*. 2021. **56**(4): 499.
19. Semchuk O.Y., Biliuk A.A., Havryliuk O.O. The Kinetic Theory of the Width of Surface Plasmon Resonance Line in Metal Nanoparticles. *Springer Proceedings in Physics*. 2021. **264**: 3.
20. Brodnikovskii D.N., Lugovoi N.I., Brodnikovskii N.P., Slyunyaev V.N., Kulak L.D., Vasil'ev A.D., Firstov S.A. Powder metallurgy production of Ti-5.4 wt.% Si alloy. I. Simulating the formation of powder particles by centrifugal atomization. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2013. **52**: 409.
21. Biliuk A.A., Semchuk O.Y., Havryliuk O.O. Kinetic theory of absorption of ultrashort laser pulses by ensembles of metallic nanoparticles under conditions of surface plasmon resonance. *Himia, Fizika ta Tehnologija Poverhni*. 2022. **13**(2): 556.
22. Ilyin A.P., Mostovshchikov A.V., Root L.O., Zmanovskiy S.V., Ismailov D.V., Ruzieva G.U. Effect of beta-radiation exposure on the parameters of aluminum micropowders activity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2019. **330**(8): 87.
23. Karachevtseva L., Kartel M., Kladko V., Gudymenko O., Bo W., Bratus V., Lytvynenko O., Onyshchenko V., Stronska O. Functionalization of 2D macroporous silicon under the high-pressure oxidation. *Applied Surface Science*. 2018. **434**: 142.
24. Brodnikovska I., Brychevskyya M., Brodnikovskyyi Y., Brodnikovskyyi D., Vasylyev O., Smirnova A. Joint impedance spectroscopy and fractography data analysis of ceria doped scandia stabilized zirconia solid electrolyte modified by powder types and sintering temperature. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*. 2018. **6**(1): 128.
25. Baglyuk G.A., Poznyak L.A. The sintering of powder metallurgy high-speed steel with activating additions. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2002. **41**(7-8): 366.
26. Brodnikovskyy D.N., Golovash A.V., Tkachenko S.V., Okun I.Yu., Kuz'menko N.N., Firstov S.A. Influence of rigid particles of silicide on character of deformation of alloys on the base of a titanium at the high temperatures. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*. 2006. **28**: 165.
27. Baglyuk G.A., Poznyak L.A. Sintered wear-resistant iron-based materials. I. Materials fabricated by sintering and impregnation. *Poroshkovaya Metallurgiya*. 2001. **1-2**: 44.
28. Zaginaichenko S.Y., Lysenko E.A., Golovchenko T.N., Javadov N.F. The forming peculiarities of C₆₀ molecule. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. 2008. **PartF2**: 5.
29. Zolotarenko O.D., Rudakova O.P., Akhanova N.E., Zolotarenko An.D., Shchur D.V., Matisina Z.A., Gabdullin M.T., Ualkhanova M., Gavrilyuk N. A., Zolotarenko O.D., Chimbay M.V., Zagorulko I.V. Comparative analysis of products in the synthesis of fullerenes and carbon nanostructures with vicarious graphite grade EGSP and MPG-7. *Nanosystems, nanomaterials, nanotechnologies*. 2022. **20**(3): 725. [Ukrainian]
30. Gun'ko V.M., Turov V.V., Zarko V.I., Prykhod'Ko G.P., Krupska T.V., Golovan A.P., Skubiszewska-Zięba J., Charmas B., Kartel M.T. Unusual interfacial phenomena at a surface of fullerite and carbon nanotubes. *Chemical Physics*. 2015. **459**: 172.
31. Nishchenko M.M., Likhtorovich S.P., Dubovoy A.G., Rashevskaya T.A. Positron annihilation in C60 fullerites and fullerene-like nanovoids. *Carbon*. 2003. **41**(7): 1381.

32. Lad'yanov V.I., Nikonova R.M., Larionova N.S., Aksenova V.V., Mukhgalin V.V., Rud' A.D. Deformation-induced changes in the structure of fullerites C_{60/70} during their mechanical activation. *Physics of the Solid State*. 2013. **55**(6):1319.
33. Matysina Z. A., Zolotarenko OI. D., Rudakova O. P., Akhanova N. Y., Pomytkin A. P., Zolotarenko An. D., Shchur D. V., Gabdullin M. T., Ualkhanova M., Gavrylyuk N. A., Zolotarenko A. D., Chymbai M. V., Zagorulko I. V. Iron in Endometallofullerenes. *Prog. Phys. Met.* 2022. **23**(3): 510.
34. Kartel M.T., Voitko K.V., Grebelna Y.V., Zhuravskiy S.V., Ivanenko K.O., Kulyk T.V., Makhno S.M., Sementsov Y.I. Changes in the structure and properties of graphene oxide surfaces during reduction and modification. *Himia, Fizika ta Tehnologija Poverhni*. 2022. **13**(2): 179.
35. Rud A.D., Kiryan I.M. Quantitative analysis of the local atomic structure in disordered carbon. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2014. **386**: 1.
36. Sementsov Yu.I., Cherniuk O.A., Zhuravskiy S.V., Bo W., Voitko K.V., Bakalinska O.M., Kartel M.T. Synthesis and catalytic properties of nitrogen-containing carbon nanotubes. *Himia, Fizika ta Tehnologija Poverhni*. 2021. **12**(2): 135.
37. Barany S., Kartel' N., Meszaros R. Electrokinetic potential of multilayer carbon nanotubes in aqueous solutions of electrolytes and surfactants. *Colloid Journal*. 2014. **76**(5): 509.
38. Schur D.V., Dubovoy A.G., Zaginaichenko S.Yu., Adejev V.M., Kotko A.V., Bogolepov V.A., Savenko A.F., Zolotarenko A.D., Firstov S.A., Skorokhod V.V. Synthesis of carbon nanostructures in gaseous and liquid medium. *NATO Security through Science Series A: Chemistry and Biology*. 2007: 199.
39. Zaginaichenko S.Y., Matysina Z.A. The peculiarities of carbon interaction with catalysts during the synthesis of carbon nanomaterials. *Carbon*. 2003. **41**(7): 1349.
40. Boguslavskii L.Z., Rud' A.D., Kir'yan I.M., Nazarova N.S., Vinnichenko D.V. Properties of carbon nanomaterials produced from gaseous raw materials using high-frequency electrodischarge processing. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015. **51**(2): 105.
41. Matysina Z. A., Zolotarenko OI. D., Ualkhanova M., Rudakova O. P., Akhanova N. Y., Zolotarenko An. D., Shchur D. V., Gabdullin M. T., Gavrylyuk N. A., Zolotarenko O.D., Chymbai M. V., Zagorulko I. V. Electric Arc Methods to Synthesize Carbon Nanostructures. *Prog. Phys. Met.* 2022. **23**(3): 528.
42. Yakymchuk O.M., Perepelytsina O.M., Rud A.D., Kirian I.M., Sydorenko M.V. Impact of carbon nanomaterials on the formation of multicellular spheroids by tumor cells. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*. 2014. **211**(12): 2778.
43. Kartel N.T., Gerasimenko N.V., Tsyba N.N., Nikolaichuk A.D., Kovtun G.A. Synthesis and study of carbon sorbent prepared from polyethylene terephthalate. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2001. **74**(10): 765.
44. Zolotarenko OI. D, Ualkhanova M.N., Rudakova E.P., Akhanova N.Y., Zolotarenko An. D., Shchur D.V., Gabdullin M.T., Gavrylyuk N.A., Zolotarenko A.D., Chymbai M.V., Zagorulko I.V., Havryliuk O.O. Advantages and disadvantages of electric arc methods for the synthesis of carbon nanostructures. *Himia, Fizika ta Tehnologija Poverhni*. 2022. **13**(2): 209. [in Ukrainian]
45. Oreshkin V.I., Chaikovskii S.A., Labetskaya N.A., Ivanov Y.F., Khishchenko K.V., Levashov P.R., Kuskova N.I., Rud' A.D. Phase transformations of carbon under extreme energy action. *Technical Physics*. 2012. **57**(2): 198.
46. Rud A.D., Lakhnik A.M., Mikhailova S.S., Karban O.V., Surnin D.V., Gilmuddinov F.Z. Structure of Mg-C nanocomposites produced by mechano-chemical synthesis. *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. **509** (SUPPL. 2): S592.

47. Zolotarenko O. D., Rudakova E. P., Zolotarenko A. D., Akhanova N. Y., Ualkhanova M. N., Shchur D. V., Gabdullin M. T., Gavrylyuk N. A., Myronenko T. V., Zolotarenko A. D., Chymbai M. V., Zagorulko I.V., Tarasenko Yu. O., Havryliuk O. O. Platinum-containing carbon nanostructures for the creation of electrically conductive ceramics using 3D printing of CJP technology. *Himia, Fizika ta Tehnologia Poverhni*. 2022. **13**(3): 259. [in Ukrainian].
48. Zolotarenko O.I.D., Rudakova E.P., Akhanova N.Y., Zolotarenko A.D., Shchur D.V., Gabdullin M.T., Ualkhanova M., Sultangazina M., Gavrylyuk N.A., Chymbai M.V., Zolotarenko A.D., Zagorulko I.V., Tarasenko Yu.O. Plasmochemical Synthesis of Platinum-Containing Carbon Nanostructures Suitable for CJP 3D-Printing. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2022. **44**(3): 343.
49. Zolotarenko O.I.D., Rudakova E.P., Akhanova N.Y., Zolotarenko A.D., Shchur D.V., Gabdullin M.T., Ualkhanova M., Gavrylyuk N.A., Chymbai M.V., Myronenko T.V., Zagorulko I.V., Zolotarenko A.D., Havryliuk O.O. Electrically conductive composites based on TiO₂ and carbon nanostructures manufactured using 3D printing of CJP technology. *Himia, Fizika ta Tehnologia Poverhni*. 2022. **13**(4): 415.
50. Zolotarenko O.I.D., Rudakova E.P., Akhanova N.Y., Zolotarenko A.D., Shchur D.V., Gabdullin M.T., Ualkhanova M., Gavrylyuk N.A., Chymbai M.V., Yu. O. Tarasenko, Zagorulko I.V., Zolotarenko A.D. Electric Conductive Composites Based on Metal Oxides and Carbon Nanostructures. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2021. **43**(10): 1417. [in Ukrainian]
51. Pylypova O., Havryliuk O., Antonin S., Evtukh A., Skryshevsky V., Ivanov I., Shmahlii S. Influence of nanostructure geometry on light trapping in solar cells. *Applied Nanoscience*. 2022. **12**(3): 769.
52. Semchuk O.Y., Biliuk A.A., Havryliuk O.O., Biliuk A.I. Kinetic theory of electroconductivity of metal nanoparticles in the condition of surface plasmon resonance. *Applied Surface Science Advances*. 2021. **3**: 100057.
53. Havryliuk O.O., Evtukh A.A., Pylypova O.V., Semchuk O.Y., Ivanov I.I., Zabolotnyi V.F. Plasmonic enhancement of light to improve the parameters of solar cells. *Applied Nanoscience*. 2020. **10**(12): 4759.
54. Stavitskaya S.S., Mironyuk T.I., Kartel' N.T., Strelko V.V. Sorption characteristics of "food fibers" in secondary products of processing of vegetable raw materials. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2001. **74**(4): 592.
55. Gun'ko V.M., Turov V.V., Krupska T.V., Pakhlov E.M. Behavior of water and methane bound to hydrophilic and hydrophobic nanosilicas and their mixture. *Chemical Physics Letters*. 2017. **690**: 25.
56. Zakutevskii O.I., Psareva T.S., Strelko V.V., Kartel' N.T. Sorption of U(VI) from aqueous solutions with carbon sorbents. *Radiochemistry*. 2007. **49**(1): 67.
57. Protsak I., Gun'ko V.M., Turov V.V., Krupska T.V., Pakhlov E.M., Zhang D., Dong W., Le Z. Nanostructured polymethylsiloxane/fumed silica blends. *Materials*. 2019. **12**(15): 2409.
58. Kartel M., Galysh V. New composite sorbents for caesium and strontium ions sorption. *Chemistry Journal of Moldova*. 2017. **12**(1): 37.
59. Gun'ko V.M., Turov V.V., Protsak I.S., Krupska T.V., Pakhlov E.M., Tsapko M.D. Effects of pre-adsorbed water on methane adsorption onto blends with hydrophobic and hydrophilic nanosilicas. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019. **570**: 471.
60. Galysh V., Sevastyanova O., Kartel M., Lindström M.E., Gornikov Y. Impact of ferrocyanide salts on the thermo-oxidative degradation of lignocellulosic sorbents. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017. **128**(2): 1019.

61. Turov V.V., Gun'ko V.M., Krupska T.V., Borysenko M.V., Kartel M.T. Interfacial behavior of polar and nonpolar frozen/unfrozen liquids interacting with hydrophilic and hydrophobic nanosilicas alone and in blends. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2021. **588**: 70.
62. Gabdullin M.T., Khamitova K.K., Ismailov D.V., Sultangazina M.N., Kerimbekov D.S., Yegemova S.S., Chernoshtan A., Schur D.V. Use of nanostructured materials for the sorption of heavy metals ions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. **511**(1): 12044.
63. Sementsov Yu.I., Prikhod'Ko G.P., Melezhik A.V., Aleksyeyeva T.A., Kartel M.T. Physicochemical properties and biocompatibility of polymer/carbon nanotubes composites. *Nanomaterials and Supramolecular Structures: Physics, Chemistry, and Applications*. 2010: 347.
64. Gun'ko V.M., Lupascu T., Krupska T.V., Golovan A.P., Pakhlov E.M., Turov V.V. Influence of tannin on aqueous layers at a surface of hydrophilic and hydrophobic nanosilicas. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2017. **531**: 9.
65. Khamitova K.K., Kayupov B.A., Yegemova S.S., Gabdullin M.T., Abdullin Kh.A., Ismailov D.V., Kerimbekov D.S. The use of fullerenes as a biologically active molecule. *International Journal of Nanotechnology*. 2019. **16**(1-3): 100.
66. Gun'ko V.M., Turov V.V., Krupska T.V., Tsapko M.D. Interactions of human serum albumin with doxorubicin in different media. *Chemical Physics*. 2017. **483-484**: 26.
67. Gun'ko V.M., Turov V.V., Krupska T.V., Protsak I.S., Borysenko M.V., Pakhlov E.M. Polymethylsiloxane alone and in composition with nanosilica under various conditions. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019. **541**: 213.
68. Krupska T.V., Turova A.A., Un'Ko V.M., Turov V.V. Influence of highly dispersed materials on physiological activity of yeast cells. *Biopolymers and Cell*. 2009. **25**(4): 290.
69. Tkachenko S., Brodnikovskiy D., Cizek J., Komarov P., Brodnikovskiy Ye., Tymoshenko Ya., Csaki S., Pinchuk M., Vasylyev O., Čelko L., Gadzyra M., Chraska T. Novel Ti–Si–C composites for SOFC interconnect materials: Production optimization. *Ceramics International*. 2022. **48**(19(A)): 27785.
70. Podhurska V., Brodnikovskiy D., Vasylyev B., Gadzyra M., Tkachenko S., Čelko L., Ostash O., Brodnikovska I., Brodnikovskiy Ye., Vasylyev O. Ti-Si-C in-situ composite as a potential material for lightweight SOFC interconnects. *Promising materials and processes in applied electrochemistry*. KNUTD. 2020: 54.
71. Brodnikovskiy Y., McDonald N., Polishko I., Brodnikovskiy D., Brodnikovska I., Brychevskiy M., Kovalenko L., Vasylyev O., Belous A., Steinberger-Wilckens R. Properties of 10Sc1CeSZ-3.5 YSZ (33-, 40-, 50-wt.%) composite ceramics for SOFC application. *Materials Today: Proceedings*. 2019. **6**: 26.
72. Polishko I., Ivanchenko S., Horda R., Brodnikovskiy Ye., Lysunenko N., Kovalenko L. Tape casted SOFC based on Ukrainian 8YSZ powder. *Materials Today: Proceedings*. 2019. **6**(2): 237.
73. Savenko A.F., Bogolepov V.A., Meleshevich K.A., Zaginaichenko S.Yu., Lototsky M.V., Pishuk V.K., Teslenko L.O., Skorokhod V.V. Structural and methodical features of the installation for the investigations of hydrogen-sorption characteristics of carbon nanomaterials and their composites. *NATO Security through Science Series A: Chemistry and Biology*. 2007: 365.
74. Zaginaichenko S., Nejat Veziroglu T. Peculiarities of hydrogenation of pentatomic carbon molecules in the frame of fullerene molecule C₆₀. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008. **33**(13): 3330.

75. Zaginaichenko S.Yu., Veziroglu T.N., Lototsky M.V., Bogolepov V.A., Savenko A.F. Experimental set-up for investigations of hydrogen-sorption characteristics of carbon nanomaterials. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. **41**(1): 401.
76. Lakhnik A.M., Kirian I.M., Rud A.D. The Mg/MAX-phase composite for hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. **47**(11): 7274.
77. Schur D.V., Zaginaichenko S.Y., Savenko A.F., Bogolepov V.A., Anikina N.S., Zolotareno A.D., Matysina Z.A., Veziroglu T.N., Skryabina N.E. Hydrogenation of fullerite C₆₀ in gaseous phase. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. 2011. **2**: 87.
78. Bogolepov V.A., Veziroglu A., Zaginaichenko S.Y., Savenko A.F., Meleshevich K.A. Selection of the hydrogen-sorbing material for hydrogen accumulators. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. **41**(3): 1811.
79. Shchur D.V., Zaginaichenko S.Y., Veziroglu A., Veziroglu T.N., Gavrylyuk N.A., Zolotareno A.D., Gabdullin M.T., Ramazanov T.S., Zolotareno A.D., Zolotareno A.D. Prospects of Producing Hydrogen-Ammonia Fuel Based on Lithium Aluminum Amide. *Russian Physics Journal*. 2021. **64**(1): 89.
80. Matysina Z.A. Phase transformations $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma \rightarrow \delta \rightarrow \varepsilon$ in titanium hydride tihx with increase in hydrogen concentration. *Russian Physics Journal*. 2001. **44**(11): 1237.
81. Trefilov V.I., Pishuk V.K., Zaginaichenko S.Yu., Choba A.V., Nagornaya N.R. Solar furnaces for scientific and technological investigation. *Renewable energy*. 1999. **16**(1-4): 757.
82. Lyashenko A.A., Adejev V.M., Voitovich V.B., Zaginaichenko S.Yu. Niobium as a construction material for a hydrogen energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1995. **20**(5): 405.
83. Lavrenko V.A., Adejev V.M., Kirjakova I.E. Studies of the hydride formation mechanism in metals. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1994. **19**(3): 265.
84. Matysina Z.A., Gavrylyuk N.A., Kartel M., Veziroglu A., Veziroglu T.N., Pomytkin A.P., Schur D.V., Ramazanov T.S., Gabdullin M.T., Zolotareno A.D., Zolotareno A.D., Shvachko N.A. Hydrogen sorption properties of new magnesium intermetallic compounds with MgSnCu₄ type structure. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. **46**(50): 25520.
85. Matysina Z.A., Pogorelova O.S., Zaginaichenko S.Yu. The surface energy of crystalline CuZn and FeAl alloys. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1995. **56**(1): 9.
86. Rud A.D., Schmidt U., Zelinska G.M., Lakhnik A.M., Kolbasov G.Ya., Danilov M.O. Atomic structure and hydrogen storage properties of amorphous-quasicrystalline Zr-Cu-Ni-Al melt-spun ribbons. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2007. **353**(32-40): 3434.
87. Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Yu. Hydrogen solubility in alloys under pressure. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1996. **21**(11-12): 1085.
88. Zaginaichenko S.Yu., Matysina Z.A., Smityukh I., Pishuk V.K. Hydrogen in lanthan-nickel storage alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2002. **330-332**: 70.
89. Lytvynenko Yu.M. Utilization the concentrated solar energy for process of deformation of sheet metal. *Renewable Energy*. 1999. **16**(1-4): 753.
90. Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Y. Sorption Properties of Iron–Magnesium and Nickel–Magnesium Mg₂FeH₆ and Mg₂NiH₄ Hydrides. *Russian Physics Journal*. 2016. **59**(2): 177.
91. Rud A.D., Schmidt U., Zelinska G.M., Lakhnik A.M., Perekos A.E., Kolbasov G.Ya., Danilov M.O. Peculiarities of structural state and hydrogen storage properties of Ti-Zr-Ni based intermetallic compounds. *Journal of Alloys and Compounds*. 2005. **404-406** (SPEC. ISS.): 515.

92. Zaginaichenko S.Y., Matysina Z.A., Teslenko L.O., Veziroglu A. The structural vacancies in palladium hydride. Phase diagram. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. **36**(1): 1152.
93. Zaginaichenko S.Y., Zaritskii D.A., Matysina Z.A., Veziroglu T.N., Kopylova L.I. Theoretical study of hydrogen-sorption properties of lithium and magnesium borocarbides. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. **40**(24):7644.
94. Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Y. Hydrogen-sorption properties of magnesium and its intermetallics with Ca₇Ge-Type structure. *Physics of Metals and Metallography*. 2013. **114**(4): 308.
95. Tikhotskii S.A., Fokin I.V. Traveltime seismic tomography with adaptive wavelet parameterization. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2011. **47**(4): 327.
96. Ushakova L.M., Ivanenko K.I., Sigareva N.V., Terets M.I., Kartel M.T., Sementsov Yu.I. Influence of nanofiller on the structure and properties of macromolecular compounds. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2022. **23**(2): 394.
97. Sementsov Y., Prikhod'ko G., Kartel M., Tsebrenko M., Aleksyeyeva T., Ulyanchychi N. Carbon nanotubes filled composite materials. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. 2011. **2**: 183.
98. Harea E., Stoček R., Storozhuk L., Sementsov Y., Kartel N. Study of tribological properties of natural rubber containing carbon nanotubes and carbon black as hybrid fillers. *Applied Nanoscience*. 2019. **9**(5): 899.
99. Gun'ko V.M., Turov V.V., Protsak I., Krupska T.V., Pakhlov E.M., Zhang D. Interfacial phenomena in composites with nanostructured succinic acid bound to hydrophilic and hydrophobic nanosilicas. *Colloids and Interface Science Communications*. 2020. **35**: 100251.
100. Kurnakov N.S. *Introduction to physical and chemical analysis* (M.–L.: Ed. Academy of Sciences of the USSR, 1940).
101. Smithells K. *Gases and metals* (M.–L.: Metallurgizdat, 1940).
102. Darken L.S., Guppi R.V. *Physical chemistry of metals* (M.: Metallurgizdat, 1960).
103. Vyhodets V.B., Goltsov V.A., Geld P.V. Diffusion of hydrogen in the CuPd alloy. *FMM*. 1968. **26**(5): 933.
104. Goltsov V.A., Vyhodets V.B., Geld P.V., Krylova T.A. Diffusion, permeability and solubility of hydrogen in CuAu alloys. *FMM*. 1970. **30**(3). 657.
105. Vyhodets V.B., Goltsov V.A., Geld P.V. *UFZh*. 1970. **15**:107.
106. Vyhodets V.B., Goltsov V.A., Geld P.B. On the theory of hydrogen diffusion in ordering alloys of the Cu/Au type. *FTT*. 1970. **12**(9): 2692.
107. Popov A.A. *Problems of metallurgy and heat treatment* (Moscow: Mashgiz, 1960).
108. Kornilov I.I. *Izv. Academy of Sciences of the USSR*. 1947. **4**: 337.
109. Bückle H. *Rev Met*. 1957. **54**: 9.
110. Zelenkov I.A., Martynchuk E.N. *Metallophysics*. 1974. **50**.
111. Borelius. *Ann. d. Physik*. 1927. **83**: 121.
112. Wegard L. *Zeit. f. Pliysik*. 1921. **5**: 17.
113. Wegard L. *Zeit. f. Kristall*. 1928. **67**: 148.
114. Stockdale D. *J. Inst. Metals*. 1940. **66**: 287.
115. Kirkendahl E.O. *Trans. AIME*. 1942. **147**: 104.
116. Owen E.A. *J. Inst. Metals*. 1947. **73**: 471.
117. Axon H., Hume-Rothery W. *Proc. Roy. Soc*. 1948. **A193**: 1.
118. Raynor G.V. *Trans. Faraday. Soc*. 1949. **45**: 698.
119. Friedel J. *Phil. Mag*. 1955. **7**(46): 514.
120. Eshelby J.D. *Solid State Physic*. 1959. **3**: 79.
121. Warren B., Averbach B., Roberts B.J. *Appl. Phys*. 1951. **22**: 1493.

122. Bradley A.I., Jay A.H. *Irona. Tteel Inst.* 1932. **125**: 339.
123. Gordy W. *Phys. Rev.* 1946. **69**: 604.
124. Pogodin S.A., Mikheeva V.I. // *Izv. SFHA.* - 1941. - T. 14. - S. 283.
125. Kuznetsov V.G. *Izv. SFHA.* 1946. **16**: 232.
126. Sivertsen D.M., Nicholson M.E. *Structure and properties of solid solutions* (Moscow: Metallurgy, 1964)
127. Nicholas J. *Proc. Phys. Soc.* 1953. **A66**: 201.
128. Huang K. *Proc. Roy. Soc.* 1947. **A190**: 102.
129. Umansky Ya.S., Finkelstein B.N., Blanter M.E., Kishkin S.T., Fastov N.S., Gorelik S.S. *Physical foundations of metallurgy* (Moscow: Metallurgizdat, 1955).
130. Landau L., Lifshitz E. *Statistical physics* (M.–L., 1940).
131. Krivoglaz M.A. *JTF.* 1954. **24**: 1077.
132. Krivoglaz M.A. *FMM.* 1955. **1**: 393.
133. Ageev N.V. *ZhNKH AS USSR.* 1958. **3**: 557.
134. Nemilov V.A., Vidusova T.A. *Institute of General Chemistry of the Academy of Sciences of the USSR. Izv. sects, platinum.* 1940. **17**: 11.
135. Ageev V.V. *Chemistry of metal alloys* (Moscow: Ed. Academy of Sciences of the USSR, 1941).
136. Mikheeva V.I. *Izv. USSR Academy of Sciences, OKHN.* 1944. **6**: 396.
137. Wolf B.K. *FMM.* 1956. **3**: 97.
138. Hume-Rothery W., Raynor G.W. *Structure of metals and alloys* (Moscow: Metallurgizdat, 1959).
139. Wolf B.K. *Advances in Chemistry.* 1960. **29**: 774.
140. Boky G.B., Vulf B.K., Smirnova N.L. *ZhSKh, Ed. Academy of Sciences of the USSR.* 1961. **2**(1): 74.
141. Samsonov G.V. *Powder metallurgy.* 1962. **2**: 3.
142. Wolf B.K. *Ternary metallic phases in alloys* (Moscow: Metallurgy, 1964).
143. Matysina Z.A., Matysina E.A. *UVZh.* 1969. **14**: 1643.
144. Matysina Z.A. *Izv. universities of the USSR, Physics.* 1971. **10**: 93.
145. Matysina Z.A., Matysina E.A. *UVZh.* 1972. **17**:14.
146. Matysina Z.A. *UVZh.* 1969. **14**(10): 1638.
147. Matysina Z.A. *UVZh.* 1972. **17**: 9.
148. Matysina Z.A., Smirnov A.A. *Questions of physics of metals and metallurgy.* 1964. **19**:136.
149. Matysina Z.A., Chernyshenko E.A. *Metallophysics.* 1968. **20**: 75.
150. Matysina Z.A., Matysina E.A., Chikarenko A.L. *Mechanism and kinetics of crystallization.* 1973.
151. Ryzhkov V.I., Smirnov A.A. *FMM.* 1964. **18**: 670.
152. Kanyuka A.K., Ryzhkov V.I., Smirnov A.A. *Metallophysics.* 1965. **3**: 22.
153. Kanyuka A.K., Smirnov A.A. *UVZh.* 1969. **14**: 1626.
154. Ryzhkov V.I. *DAN Ukrainian SSR, ser. A.* 1970. **3**: 277.
155. Goltsov V.A., Geld P.V., Simakov Yu.P., Steinberg M.M., Vyhodets V.A. *Diffusion processes in metals.* 1969. **17**: 92.

SOLUBILITY OF HYDROGEN IN METALS AND THEIR ALLOYS

An.D. Zolotarenko^{1,2}, Ol.D. Zolotarenko^{1,2}, Z.A. Matysina¹, N.A. Shvachko^{1,3}, N.Y. Akhanova^{4,5}, M. Ualkhanova⁵, D.V. Schur^{1,6}, M.T. Gabdullin⁴, Yu.I. Zhirko⁶, A.D. Zolotarenko¹, E.P. Rudakova^{1,2}, M.V. Chymbai^{1,2}, E.A. Kamenetskaya¹

¹ Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of N.A.S. of Ukraine, 3, Krzhizhanovskogo Str., 03142, Kyiv, Ukraine * A.D.Zolotarenko@gmail.com

² Chuiko Institute of Surface Chemistry, of the N.A.S. of Ukraine, 17 General Naumov Str., 03164, Kyiv, Ukraine. O.D.Zolotarenko@gmail.com .

³ Kyiv National University of Construction and Architecture, 31, Povitroflotskyi Avenue., Kyiv, 03037, Ukraine.

⁴ Kazakhstan-British Technical University, 59, Tole bi Str., 050000, Almaty, Kazakhstan

⁵ Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi, 71, 050040, Almaty, Kazakhstan.

⁶ The Institute of Applied Physics, Nat. Acad. of Sci. of Ukraine, 58, Petropavlivska Str., Sumy 40000, Ukraine.

The review material reveals the question of the influence of impurities on the physical properties of alloys, as well as the influence of gases on processes in alloys. It has been established that the presence of hydrogen affects diffusion in alloys, and gases have a significant effect on the thermoelectromotive force of metals.

The paper describes the addition of a third element to binary systems, which can expand or narrow the domain of existence of an ordered phase. The above examples of adding an impurity of vanadium or molybdenum to an alloy of iron and chromium increase the ordering temperature.

It has been established that gases can have a significant effect on the thermoelectromotive force of metals and increase the hardness and reduce the ductility of metals, as well as cause their brittleness and delamination. It has been established that hydrogen (H₂) in alloys (for example, Fe-Ni and Au-Cu) affects diffusion and atomic ordering processes. Also, a small concentration of hydrogen, as an impurity, can change the electrical resistance of alloys (for example, in a Pd-Au alloy).

It has been established that the addition of a third element to binary systems can change the state diagram, which must be taken into account when solving problems for the production of heat treatment modes for alloys, determining the conditions for phase equilibrium, etc.

The paper considers the dependence of hydrogen solubility on temperature in metals (Cu, Fe and Al) and establishes the dependence of hydrogen solubility in a metal on the concentration of impurity metals. The temperature dependence of hydrogen solubility in Fe-V alloys is also shown.

The shift of the density of state is studied for different distributions of impurity atoms in the alloy in the order-disorder system, and the dependence of the density of states of disordered and ordered solid solutions is studied.

The dependence of the relative solubility of atoms introduced into the pores of alloys with an fcc structure (of the Cu₃Au type) is indicated, taking into account the solubility, on the parameter χ , which is proportional to the degree of long-range order in the octahedral and tetrahedral pores of the alloys. The dependence of the relative solubility of intercalated atoms in octahedral pores of alloys with a bcc structure (such as CuZn and Fe₃Al) is considered.

A plot of the dependence of the concentration of dissolved impurity atoms on the degree of order is shown for substitutional alloys with a bcc lattice, where the M2 coefficient is introduced, which does not depend on the degree of order.

The effect of pressure as a measure of long-range order is also studied, where its step decreases or increases, or decreases and then increases and vice versa (order-disorder phase transition).

An equally important result is the graphic dependence of solubility (c) on pressure (P) in disordered and ordered alloys.

Keywords: *solubility, impurities, hard solution, doping, multicomponent content, order-disorder, alloys, metals, hydrogen.*