

PACS numbers: 64.75.Nx, 75.30.Kz, 75.50.Bb, 75.50.Ee, 75.80.+q, 81.30.Hd, 81.30.Kf

Про особливості магнетного стану стопів γ -Fe–Ni

I. В. Золотаревський, В. Ю. Ольшанецький

*Національний університет «Запорізька політехніка»,
вул. Жуковського, 64,
69063 Запоріжжя, Україна*

Проаналізовано магнетну структуру, нерівноважний і рівноважний стани та магнетні неоднорідності аустеніту в інварних Fe–Ni-стопках з метою обґрунтування можливості наявності концентраційних неоднорідностей з дезорієнтованою магнетною структурою, які можуть бути центрами магнетного $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -переходу першого роду. Узагальнено результати розглянутих експериментальних і теоретичних досліджень цієї системи. Показано, що самі по собі магнетна структура та нерівноважний стан аустеніту не можуть привести до появи концентраційних (магнетних) неоднорідностей в інварних стопках. Припускається, що наявні концентраційні неоднорідності мають флюктуаційне походження. Запропоновано модель, який пояснює основні інварні властивості стопів Fe–Ni наявністю оригінальної магнетної структури аустеніту та його неоднорідним і нерівноважним станом відносно α -фази. Вона передбачає, що концентраційні неоднорідності з дезорієнтованою магнетною структурою в аустеніті інварних стопів Fe–Ni у широкому температурному інтервалі, — від точки Кюрі до мартенситної точки, — можуть відігравати роль стиснутих пружних елементів усередині феромагнетної γ -фази. Фактично вони являють собою докритичні зародки α -мартенситу магнетного фазового переходу першого роду. Аномально великі зміни об'єму інварних стопів Fe–Ni відбуваються внаслідок спільної дії термодинамічного стимулу в γ -фазі, об'єм якої «підштовхують» до зростання численні ділянки неоднорідностей (докритичні зародки α -фази), і зміни її намагнетованості в сильному магнетному полі та/або через охоло-

Corresponding author: Ivan Volodymyrovych Zolotarevs'kyi
E-mail: zolotarevsky.i@gmail.com

*Zaporizhzhia Polytechnic National University,
64 Zhukovsky Str., UA-69063 Zaporizhzhya, Ukraine*

Citation: I. V. Zolotarevs'kyi and V. Yu. Ol'shanets'kyi, On the Features of the Magnetic State of γ -Fe–Ni Alloys, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 45, No. 11: 1281–1292 (2023) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.45.11.1281](https://doi.org/10.15407/mfint.45.11.1281)

дження внаслідок упорядкування атомових магнетних моментів.

Ключові слова: інварні стопи, концентраційні магнетні неоднорідності, обмінний інтеграл, точки Кюрі та Неєлева, рівноважний і нерівноважний стани, γ -фази Fe_3Ni і FeNi , звичайний і магнетний мартенситні $\gamma \rightarrow \alpha$ -переходи.

The magnetic structure, nonequilibrium and equilibrium states, and magnetic inhomogeneities of austenite in invar Fe–Ni alloys are analysed to substantiate the possibility of the existence of concentration inhomogeneities with a disoriented magnetic structure, which can be the centres of the magnetic $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -transition of the first kind. The results of the considered experimental and theoretical studies of this system are summarised. As shown, the magnetic structure and non-equilibrium state of austenite alone cannot lead to the appearance of concentration (magnetic) inhomogeneities in invar alloys. As assumed, the existing concentration inhomogeneities are of fluctuation origin. A model is proposed that explains the basic invar properties of Fe–Ni alloys by the existence of the original magnetic structure of austenite and its inhomogeneous and non-equilibrium state relative to the α -phase. It assumes that concentration inhomogeneities with a disoriented magnetic structure in the austenite of invar Fe–Ni alloys in a wide temperature range, from the Curie point to the martensitic point, can play the role of compressed elastic elements in the interior of the ferromagnetic γ -phase. In fact, they are the subcritical nuclei of α -martensite of the first kind magnetic phase transition. Abnormally large changes in the volume of invar Fe–Ni alloys occur as a result of the combined action of a thermodynamic stimulus in the γ -phase, whose volume is ‘pushed’ to grow by numerous areas of inhomogeneities (subcritical nuclei of the α phase), and changes in its magnetisation in a strong magnetic field and/or during cooling due to the ordering of atomic magnetic moments.

Key words: invar alloys, concentration magnetic inhomogeneities, exchange integral, Curie and Neel points, equilibrium and non-equilibrium states, Fe_3Ni or FeNi γ -phases, ordinary and magnetic martensitic $\gamma \rightarrow \alpha$ -transitions.

(Отримано 14 червня 2023 р.; остаточн. варіант — 1 вересня 2023 р.)

1. ВСТУП

Залізо використовується людством з давніх часів. Зокрема, з давнини знаходять використання феромагнетні властивості звичайної об’ємноцентрованої кубічної модифікації заліза (α -фази). Але основні магнетні властивості гранецентрованої кубічної модифікації заліза (γ -фази) були досліджені порівняно недавно, у другій половині ХХ століття. Магнетні властивості γ -Fe різко відрізняються від магнетних властивостей α -Fe. За низьких температур воно є антиферомагнетним. Твердий розчин феромагнетного нікелю у γ -залізі має незвичайні властивості, які називають інварними. Аномально велика спонтанна магнетострикція інварних стопів нижче точки

Кюрі практично повністю компенсує звичайні температурні зміни об'єму. В магнетному полі в області парапроцесу теж виникає аномально велика вимушена (об'ємна) магнетострикція. Питання про причини інварних аномалій у літературі відоме як «проблема інвару» [1]. Наразі немає повної закінченої теорії щодо особливостей фізичних властивостей цих стопів.

Крім стопів Fe-Ni, інварні властивості мають також стопи Fe-Pt і Fe-Pd. Всі ці стопи в інварній області концентрацій є феромагнетиками з одним типом ґратниці, подібними фізичними властивостями та розташовані в області великих концентрацій Феруму поблизу фазової границі мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення.

В роботах [2–5] показано, що інварні властивості (спонтанна та вимушена магнетострикції) можуть впливати на характер мартенситного перетворення. За певних критичних міжатомових віддалей у ГЦК-ґратниці змінюється механізм мартенситного переходу зі звичайного на магнетний. Воднораз центрами виникнення кристалів мартенситу під час магнетного переходу можуть бути магнетні неоднорідності з дезорієнтованою магнетною структурою типу «спінове скло».

Отже, визначення магнетного стану аустеніту в околі мартенситних точок може стати основою для пояснення особливостей мартенситного перетворення у стопів заліза.

2. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В бінарних системах елементів групи Феруму є такі системи, твердий розчин яких за любых концентрацій має один тип ґратниці, а самі елементи на кривій Бете-Слетера мають протилежні типи магнетного упорядкування. Обмежившись прямолінійною залежністю зміни інтеграла обмінної взаємодії A в цих системах від фактора a/d (відношення міжатомової віддалі до діаметра незаповненої оболонки), одержуємо пряму лінію, що з'єднує точки $+A$ і $-A$. За перетином цієї прямої з віссю концентрації компонентів знаходимо точку (сингулярну), у якій для $A \approx 0$ вектори магнетних моментів атомів втрачають колінеарність. Оцінку такої точки для стопів γ -Fe-Ni даним методом зроблено в роботі [6].

Розглянемо спочатку іншу подібну систему. На рисунку 1 зображено відомі температурні залежності точок Кюрі та Неслевої для стопів α -Fe-Cr [7]. Відрізок прямої, що з'єднує величини обмінних інтегралів у відносних одиницях для α -Fe і Cr, перетинає вісь концентрації у точці:

$$c_{\text{Fe}} = \frac{A_{\alpha\text{-Fe}}}{A_{\alpha\text{-Fe}} + A_{\text{Cr}}} = \frac{T_{\text{C}}}{T_{\text{C}} + T_{\text{N}}} = \frac{1042}{1042 + 312} = 77 \text{ ат. \%},$$

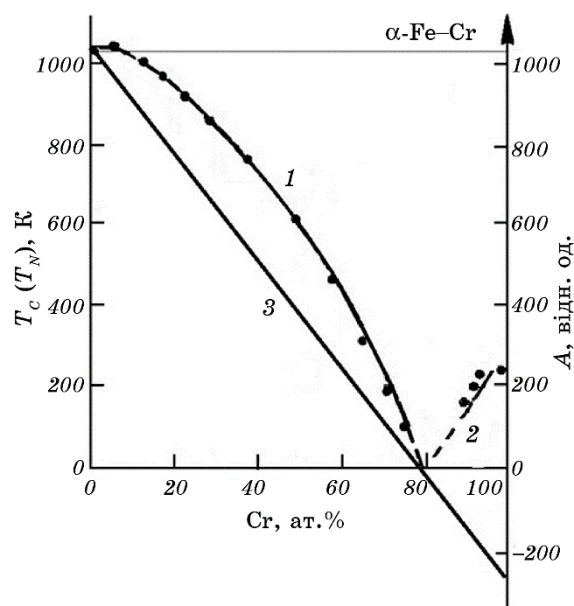


Рис. 1. Експериментальні залежності точок Кюрі (1) і Неєлевих точок (2) [7] та теоретична залежність обмінного інтеграла A в першому наближенні (3) від концентрації Cr в системі α -Fe–Cr.

Fig. 1. Experimental dependences of Curie points (1) and Neel points (2) [7] and the theoretical dependence of the exchange integral A within the first approximation (3) on the Cr concentration in the α -Fe–Cr system.

$$c_{\text{Cr}} = \frac{A_{\text{Cr}}}{A_{\alpha\text{-Fe}} + A_{\text{Cr}}} = \frac{T_N}{T_C + T_N} = \frac{312}{1042 + 312} = 23 \text{ ат.}\%$$

Як видно з рисунку, одержане значення сингулярної точки для системи α -Fe–Cr добре узгоджується з результатами експериментів. Тобто для $A \approx 0$ концентраційні залежності точок Кюрі і Неєлевих точок (криві 1 і 2) фактично сходяться на січному відрізку 3.

Що стосується системи γ -Fe–Ni, то для неї виявлено значні розходження між теорією й експериментом. Це можна спостерігати на рис. 2. Теоретичні оцінки дають величину сингулярної точки:

$$c_{\text{Fe}} = 90,43 \text{ ат.}\%, c_{\text{Ni}} = 9,57 \text{ ат.}\%.$$

Експериментальні міряння точок Кюрі за низьких температур обмежені виникненням ізотермічного мартенситного перетворення, яке до магнетного переходу не має відношення. Екстраполяція тих даних, які є, до температури 0 К ($A \approx 0$) вказує на концентрацію Ni в твердому розчині в межах $c_{\text{Ni}} \approx 20$ –25 ат.%, що переви-

щує теоретичну оцінку по ніклю в 2–2,5 рази (див. рис. 2).

Значне розходження між теоретичною оцінкою й екстрапольованою величиною співвідношення складів Феруму та Ніклю в стопах γ -Fe-Ni для перетворення «феромагнетизм \leftrightarrow антиферомагнетизм» не можна пояснити похибкою методу досліджень.

Для ступів α -Fe-Cr (рис. 1) аналогічні дослідження показують добре узгодження теоретичних і експериментальних значень. Це також не можна пояснити внутрішнім перерозподілом компонентів ступів. Навіть якщо нікель виділиться повністю в окрему фазу, то температура Кюрі зростає, хоча загальний (середній) хемічний склад конкретного ступу лишитья без змін. Тобто порівняльна аналіза свідчить (рис. 2), що експериментальна величина точок Кюрі ступів γ -Fe-Ni в області великих концентрацій Феруму значно менша за очікувану.

Враховуючи, що точки Кюрі T_C однозначно пов'язані з обмінним інтегралом A залежністю

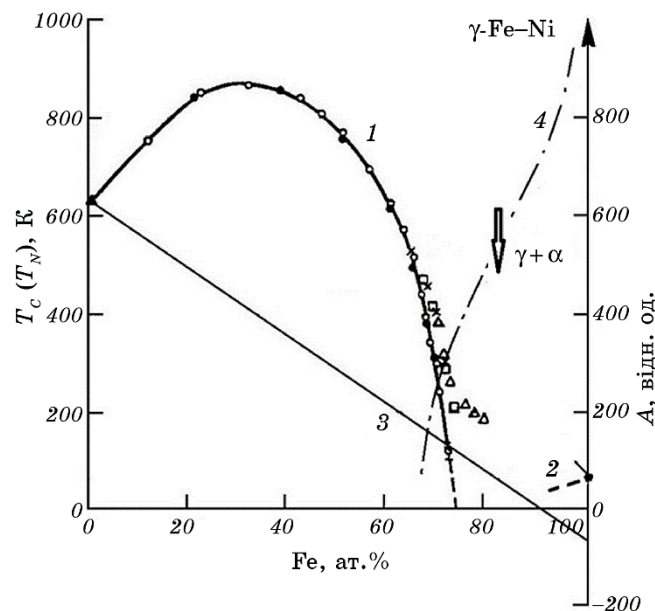


Рис. 2. Експериментальна залежність точок Кюрі (1) [1] і теоретична залежність обмінного інтеграла A в першому наближенні (3) від концентрації Fe в системі γ -Fe-Ni, 2 — Неелева точка γ -Fe, 4 — концентраційна залежність мартенситних точок M_S для охолодження.

Fig. 2. The experimental dependence of Curie points (1) [1] and the theoretical dependence of the exchange integral A within the first approximation (3) on the Fe concentration in the γ -Fe-Ni system, 2—Neel point of γ -Fe, 4—concentration dependence of martensitic points M_S during cooling.

$$T_c = \frac{z}{2k_B} A ,$$

де z — координаційне число, k_B — Больцманнова стала, можна зробити висновок, що в області інварних складів обмінний інтеграл зменшується. Зменшення величини A може бути пов'язане з переходом колінеарної феромагнетної структури стопів γ -Fe-Ni (зокрема, Fe₂₀Ni₈₀-пермалою) у неколінеарну. Це можливе з виникненням магнетних неоднорідностей у стопах. Водночас проєкція атомових магнетних моментів на вибраний напрямок магнетного поля буде менше середнього значення атомових магнетних моментів по стопу.

Неоднорідну магнетну структуру залізоніклевих стопів спостерігали в ряді робіт. Окремі ділянки аустеніту мають різні точки Кюрі [8]. Є також ділянки розміром у 1–2 нм, які ідентифіковано як парамагнетні або антиферомагнетні [9–11]. Неоднорідну магнетну структуру аустеніту виявлено також у системах Fe-Ni-Cr, C-Fe-Ni-Cr [1, 12].

Крім магнетної неоднорідності стопів Fe-Ni, в літературі обговорюється також їхня концентраційна та деформаційна неоднорідності. Вважається, що всі ці неоднорідності є одночасно [1]. Важливим є питання про виникнення неоднорідної структури, оскільки з нею пов'язують наявність інварних властивостей системи γ -Fe-Ni.

Статистичні флюктуації. Одне з можливих пояснень походження концентраційних неоднорідностей у стопах Fe-Ni ґрунтується на визнанні головної ролі статистичних флюктуацій складу аустеніту у виникненні інварних особливостей. Флюктуації складу, які залишаються після гартування, в інварних стопах Fe-Ni приводять до «розмазаности» концентраційного переходу від феромагнетизму до антиферомагнетизму. Це явище може бути пов'язане з виникненням кластерів γ -Fe, магнетні властивості яких відрізняються від однорідного стопу. Висновки щодо конкретних магнетних властивостей цих кластерів робилися на основі двох різних припущень [1, 9, 10].

Один підхід до інтерпретації магнетних властивостей кластерів заліза ґрунтується на врахуванні ролі негативної обмінної взаємодії між атомами Феруму в ГЦК-ґратниці. Передбачається, що ця взаємодія приводить або до розупорядкованости магнетних моментів цих атомів, або до виникнення антиферомагнетного порядку в кластері. Водночас абсолютна величина магнетних моментів атомів Феруму залишається незмінною.

Інше припущення ґрунтується на врахуванні впливу міжатомової взаємодії на абсолютну величину магнетних моментів атомів Феруму, відомого як «ефект локального середовища». В тих випадках, коли атом Феруму має у своєму найближчому оточенні у кристалічній ґратниці γ -Fe-Ni менше дев'ятох атомів Феруму, цей вибраний атом має магнетний момент, близький до максимального значення

($\approx 2,8\mu_B$). Якщо ж у числі найближчих сусідів вибраного атому Феруму є дев'ять або більше атомів цього ж сорту (Феруму), то цей вибраний атом Феруму втрачає свій магнетний момент (див. [1], с. 194).

Можливість впливу локального середовища, як на величину, так і на напрямок магнетних моментів атомів Феруму в інварних стопах Fe-Ni, відмічалася зокрема в [11].

Конкуренція феромагнетної й антиферомагнетної взаємодій. Є декілька моделей, що пояснюють інварні властивості стопів заліза, спираючись на складну магнетну взаємодію в них.

За Зінером (див. [1], с. 162–163) магнетні властивості всіх перехідних металів групи Феруму визначаються конкуренцією двох механізмів обміну: феромагнетної взаємодії $3d$ -електронів, локалізованих в різних вузлах кристалічної ґратниці (непрямий обмін через електрони провідності), та прямої антиферомагнетної взаємодії між $3d$ -елекtrонами, що знаходяться у сусідніх вузлах кристалічної ґратниці. Непряма обмінна взаємодія є далекосяжною, тоді як пряма — короткосяжною. Зміна міжатомової віддалі (або розмірів $3d$ -оболонки) сильно впливає на короткосяжну антиферомагнетну взаємодію. Цим можна пояснити наявність феромагнетизму у Ni, Co й α -Fe і антиферомагнетизму у γ -Fe, Mn й Cr, а також велику крутизну залежності обмінного інтеграла A від міжатомової віддалі в системі Fe-Ni інварних складів.

Більш конкретним є модель Кондорського та Седова [1]. В ньому інтерпретація особливостей стопів Fe-Ni ґрунтується на антиферомагнетизмі γ -Fe, експериментально відкритому в роботі [13]. Цей модель передбачає, що параметер обмінної взаємодії між сусідніми атомами Fe-Fe є негативною величиною, тоді як для пар атомів Ni-Ni і Ni-Fe він вважається позитивним. Даний модель допускає можливість виникнення значної додатньої об'ємної магнетострикції у сильному магнетному полі та зі зменшенням температури без поля (спонтанна магнетострикція).

Можна було б допустити, що конкуренція магнетної взаємодії між атомами Fe-Fe і Ni-Ni приводить до сегрегації атомів Феруму та Ніклю і, таким чином, несе відповідальність за утворення концентраційних неоднорідностей у стопах γ -Fe-Ni (див. рис. 2). Разом з тим, подібне явище мало б спостерігатися і в системі α -Fe-Cr, бо магнетна взаємодія пар атомів α -Fe-Fe (феромагнетна) та Cr-Cr (антиферомагнетна) теж утворює конкурентну систему. Але ніяких особливостей щодо концентраційних залежностей точок Кюрі та Неєлевої для системи α -Fe-Cr не спостерігається (див. рис. 1). Отже, магнетна конкуренція атомів у стопах γ -Fe-Ni є необхідною, але не достатньою умовою виникнення інварних особливостей.

Атомової взаємодія в системі Fe-Ni. Є моделі, які передбачають можливість виникнення концентраційних неоднорідностей в результаті хемічної взаємодії атомів у системі Fe-Ni.

Експерименти з опромінювання інварних Fe–Ni-стопів швидкими електронами (3 MeV) привели Шамбро із співробітниками [14] до висновку про те, що стан γ -Fe–Ni-стопів є метастабільним. В рівноважному стані ці стопи мають складатися з двох γ -фаз, що мають різний концентраційний склад. Склад однієї γ -фази відповідає стехіометричному складу Fe_3Ni . Друга γ -фаза має еквіатомовий склад FeNi . Такий двофазний стан виникає в опромінених зразках інварних FeNi-стопів за температур у $250\text{--}80^\circ\text{C}$ в результаті дифузії вакансій, які виникають в процесі опромінювання. Цей процес перебігає достатньо швидко за температур, близьких до кімнатної (рис. 3).

Дослідження, виконані в роботі [14] різними методами, показали, що фізичні властивості стопів Fe–Ni в двофазному стані різко відрізняються від властивостей вихідних інварних стопів. Фаза Fe_3Ni є парамагнетиком, тоді як еквіатомова фаза FeNi — феромагнетиком. Ці фази мають близькі міжатомові віддалі. В зв'язку з цим на їхній міжфазній межі зберігається когерентність кристалічної ґратниці. Такому стану можна приписати одне значення параметра кристалічної ґратниці (див. рис. 3).

Важливо, що в двофазному стані у цих стопів відсутній основний

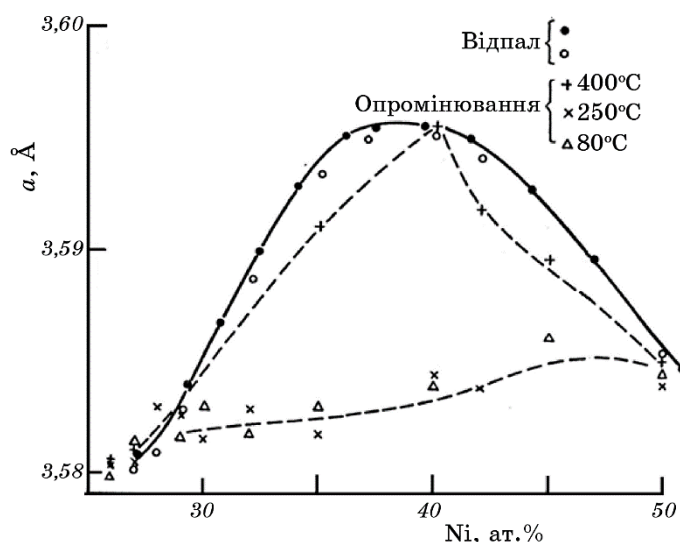


Рис. 3. Залежність параметра кристалічної ґратниці a стопів γ -Fe–Ni від складу за кімнатної температури після відпалу (суцільна лінія) та після опромінювання швидкими електронами за різних температур (штрихові лінії) [14].

Fig. 3. Dependence of the γ -Fe–Ni lattice parameter a on the composition at room temperature after annealing (solid line) and after irradiation with fast electrons at different temperatures (dashed lines) [14].

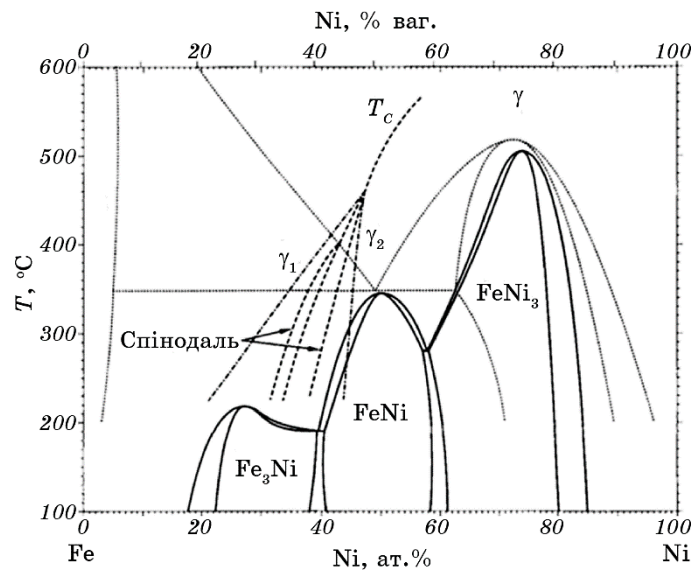


Рис. 4. Рівноважний стан системи Fe-Ni [16].

Fig. 4. Equilibrium state of the Fe-Ni system [16].

інварний ефект. Тобто коефіцієнт теплового розширення має нормальне значення. Крім того, за низьких температур не спостерігалося і мартенітне $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення [14].

Результати, одержані авторами роботи [14], підтверджено дослідженнями залізніклевих метеоритів інварних складів [15]. Границі рівноважного стану системи Fe-Ni за даними роботи [16] представлено на рис. 4.

Автори роботи [17] дійшли висновку, що основні інварні особливості стопів γ -Fe-Ni є наслідком їхнього нерівноважного стану.

Метастабільність інварних стопів по відношенню до α -фази. Спроби пояснити аномалії інвару впливом об'ємного ефекту під час $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -перетворення робилися давно. Але після уточнення діаграми стану, було встановлено, що воно не спостерігається в стопах Fe-Ni з масовою часткою Нікелю більше 34% ні за яких температур, тоді як у класичному стопі «інвар» Ні становить 36%, а в стопі «платиніт» — 42%. У зв'язку з цим, питання про вплив $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -перетворення на основні інварні властивості стопів Fe-Ni було знято з обговорення [18]. Разом з тим, питання про метастабільність інварних стопів по відношенню до α -фази залишається актуальним. Потрібно відмітити, що за довготривалого відпалу стопів Fe-Ni з 30–40% Ni за 400°C спостерігалася змішана структура α - і γ -фаз різних складів [1]. Але за менших температур і генерації вакансій порівняно швидко виникала структура з двома γ -фазами [14].

Проаналізуємо можливу роль цих двох рівноважних станів на формування властивостей нерівноважного аустеніту.

Якщо припустити, що у нерівноважному аустеніті головну роль відіграє тенденція до хемічної атомової взаємодії, то ця взаємодія, як видно з рис. 3, веде до зменшення параметра ґратниці. Максимально можлива зміна об'єму під час переходу від нерівноважного до абсолютно рівноважного стану ($\text{Fe}_3\text{Ni} + \text{FeNi}$) для інвару Fe–36Ni становить $\cong 1\%$. Невідомо, як з температурою може змінюватися характер такої взаємодії. Щоб компенсувати теплове розширення через ангармонічні коливання атомів через нагрівання, хемічні сили мають збільшуватися та стискати тіло. З охолодженням, навпаки, хемічна взаємодія мала б зменшуватися, щоб його розширити.

Щоб відповісти на це питання, треба розглянути можливу дію цих сил на зразок у сильному магнетному полі. Відомо, що вимушена магнетострикція інварних стопів Fe–Ni є аномально великою і має додатній знак. І це треба пояснити. Хемічна ж взаємодія, як видно з досліду (див. рис. 3), має протилежний знак величини зміни об'єму. Це означає, що і зі зміною температури хемічні сили не допомагатимуть реальній зміні об'єму зразка, а можливо, навпаки, будуть протидіяти його змінам.

Припустимо тепер, що у нерівноважному аустеніті важливу роль відіграє тенденція до розширення ґратниці з охолодженням за рахунок виникнення α -фази. Доведено, що за низьких температур у стопів Fe–Ni у магнетному полі можливий магнетний мартенситний $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехід [2–5]. В деяких стопах Fe–Ni–C такий магнетний перехід спостерігається і без магнетного поля [4]. Вважається, що центрами росту цих мартенситних кристалів, як в магнетному полі, так і без нього, є магнетні неоднорідності з дезорієнтованою магнетною структурою, розміри яких перевищують критичні [5]. Відомо, що розмір магнетних неоднорідностей у стопах Fe–Ni в своїй більшості становить $\cong 1$ нм, що менше критичного (за нашими оцінками розмір критичного зародку мартенситу може становити $\cong 2$ нм [5]). Магнетні неоднорідності з дезорієнтованою магнетною структурою в оточувальній феромагнетній основі γ -фази нижче точки Кюрі мають підвищену енергію. Ці неоднорідності мають у своєму складі більшу кількість атомів Феруму, ніж сусідні феромагнетні ділянки. Для них енергетично вигідно перейти у феромагнетну колінеарну структуру — ідеально, у феромагнетну α -фазу (ОЦК) з більшою міжатомовою віддаллю [2–4]. Тобто перетворення в них може йти за схемою, яка знаходиться в температурному інтервалі від точки Кюрі T_c до мартенситної точки M_s , за якої мартенситні зародки (магнетні чи то дислокаційні) досягають критичного розміру. В цьому температурному інтервалі для обговорюваних магнетних (концентраційних) неоднорідностей такий процес може бути повністю оборотним. Він стає необоротним тоді, коли зародки мартенситу перет-

ворюються у центри росту мартенситних кристалів.

Отже, магнетні неоднорідності з дезорієнтованою магнетною структурою в аустеніті інварних стопів Fe-Ni в достатньо широкому температурному інтервалі можуть відігравати роль стиснутих пружних елементів усередині феромагнетної γ -фази, яка теж не є ідеальною колінеарною магнетною структурою.

Сильне магнетне поле в області парапроцесу й охолодження нижче точки Кюрі збільшують намагнетованість стопів Fe-Ni завдяки відповідній орієнтації їхніх атомових магнетних моментів і тим самим збільшують об'єм аустеніту. Воднораз зростає ступінь переохолодження γ -фази, об'єм якої «підштовхується» до збільшення численними ділянками неоднорідностей, готових до $\gamma \rightarrow \alpha$ -переходу.

Таким чином, інварні аномалії стопів Fe-Ni можуть бути пояснені нерівноважністю високотемпературної γ -фази по відношенню до α -фази та її складною, неоднорідною магнетною структурою.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. В. Л. Седов, *Антиферромагнетизм гамма-железа. Проблема инвара* (Москва: Наука: 1987).
2. И. В. Золотаревский, *Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении*, № 2: 22 (2020).
3. I. V. Zolotarevsky, M. O. Schetinina, and O. I. Zolotarevsky, *Physics of Metals and Metallography*, **122**: 127 (2021).
4. І. В. Золотаревський, *Металлофиз. новейшие технол.*, **44**, № 2: 159 (2022).
5. І. В. Золотаревський, В. Ю. Ольшанецький, М. О. Щетініна, *Металлофиз. новейшие технол.*, **45**, № 5: 699 (2023).
6. В. Ю. Ольшанецький, І. В. Золотаревський, *Нові матеріали і технології в металургії і машинобудуванні*, № 2: 107 (2022).
7. С. В. Вонсовский, *Магнетизм* (Москва: Наука: 1971).
8. С. В. Григорьев, *Исследование критических явлений вблизи точки Кюри в инварных железо-никелевых сплавах поляризованными нейтронами* (Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук) (Санкт-Петербург: 1998).
9. А. З. Меньшиков, В. А. Шестаков, *Физ. мет. металловед.*, **43**, № 4: 722 (1977).
10. В. И. Гоманьков, Е. В. Козис, Б. Н. Мохов, *Доклады АН СССР*, **225**: 807 (1975).
11. В. А. Макаров, И. М. Пузей, Т. В. Сахарова, О. В. Басаргин, *ЖЭТФ*, **88**, № 4: 1406 (1985).
12. Л. Д. Ворончихин, Э. А. Завадский, И. Г. Факидов, *Физ. мет. металловед.*, **20**, № 5: 793 (1965).
13. Е. И. Кондорский, В. Л. Седов, *ЖЭТФ*, **35**: 1579 (1958).
14. A. Chamberod, J. Laugier, and J. M. Penisson, *J. Magn. Magn. Mater.*, **10**: 139 (1979).
15. K. B. Reuter, D. B. Williams, and J. I. Goldstein, *Metall. Trans. A*, **20**, No. 4: 719 (1989).
16. L. J. Swartzendruber, V. P. Itkin, and C. B. Alcock, *J. Phase Equilibria*, **12**,

- No. 3: 288 (1991).
17. J. R. Guimaraes, J. Danon, R. B. Scorzelli, and I. S. Azevedo, *J. Phys. F: Metal Physics*, **10**: L197 (1980).
 18. К. П. Белов, *Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных металлах* (Москва–Ленинград: ГИТТЛ: 1951).

REFERENCES

1. V. L. Sedov, *Antiferromagnetism Gamma-Zheleza. Problema Invara* [Antiferromagnetism of Gamma Iron. The Invar Problem] (Moskva: Nauka: 1987) (in Russian).
2. I. V. Zolotarevskiy, *Novyye Materialy i Tekhnologii v Metallurgii i Mashinostroenii*, No. 2: 22 (2020) (in Russian).
3. I. V. Zolotarevsky, M. O. Schetinina, and O. I. Zolotarevsky, *Physics of Metals and Metallography*, **122**: 127 (2021).
4. I. V. Zolotarevs'kyy, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 2: 159 (2022) (in Ukrainian).
5. I. V. Zolotarevs'kyy, V. Yu. Ol'shanets'kyy, and M. O. Shchetinina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**, No. 5: 699 (2023) (in Ukrainian).
6. V. Yu. Ol'shanets'kyy and I. V. Zolotarevs'kyy, *Novi Materialy i Tekhnologiyi v Metalurgiyi i Mashynobuduvanni*, No. 2: 107 (2022) (in Ukrainian).
7. S. V. Vonsovskiy, *Magnetizm* [Magnetism] (Moskva: Nauka: 1971) (in Russian).
8. S. V. Grigor'ev, *Issledovanie Kriticheskikh Yavleniy vblizi Tochki Kyuri v Invarnykh Zhelezo-Nikelevykh Splavakh Polyarizovannymi Neitronami* [Investigation of Critical Phenomena near the Curie Point in Invar Iron–Nickel Alloys by Polarized Neutrons] (Thesis of Disser. for Cand. Phys.-Math. Sci.) (Saint Petersburg: 1998) (in Russian).
9. A. Z. Men'shikov and V. A. Shestakov, *Fiz. Met. Metalloved.*, **43**, No. 4: 722 (1977) (in Russian).
10. V. I. Goman'kov, E. V. Kozis, and B. N. Mokhov, *Doklady AN SSSR*, **225**: 807 (1975) (in Russian).
11. V. A. Makarov, I. M. Puzey, T. V. Sakharova, and O. V. Basargin, *ZhETF*, **88**, No. 4: 1406 (1985) (in Russian).
12. L. D. Voronchikhin, E. A. Zavadskiy, and I. G. Fakidov, *Fiz. Met. Metalloved.*, **20**, No. 5: 793 (1965) (in Russian).
13. E. I. Kondorskiy and V. L. Sedov, *ZhETF*, **35**: 1579 (1958) (in Russian).
14. A. Chamberod, J. Laugier, and J. M. Penisson, *J. Magn. Magn. Mater.*, **10**: 139 (1979).
15. K. B. Reuter, D. B. Williams, and J. I. Goldstein, *Metall. Trans. A*, **20**, No. 4: 719 (1989).
16. L. J. Swartzendruber, V. P. Itkin, and C. B. Alcock, *J. Phase Equilibria*, **12**, No. 3: 288 (1991).
17. J. R. Guimaraes, J. Danon, R. B. Scorzelli, and I. S. Azevedo, *J. Phys. F: Metal Physics*, **10**: L197 (1980).
18. К. П. Белов, *Упругие, Тепловыие и Электрические Явления в Ферромагнитных Металлах* [Elastic, Thermal and Electrical Phenomena in Ferromagnetic Metals] (Moskva–Leningrad: GITTL: 1951) (in Russian).