

DOI: 10.34185/1991-7848.2024.01.08

УДК 669.02/09:669.168:669.15'74-198..003.12

Д.М. Тогобицька, І.Р. Поворотня, В.П. Піптюк,  
С.В. Греков, О.В. Кукса

**ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА ОЦІНКИ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ТА  
ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
МАРГАНЕЦЬВМІСНИХ ФЕРОСПЛАВІВ**

***Анотація.** Марганецьвмісні феросплави у сталеплавильному виробництві є безумовним лідером при розкисленні сталі, однак також використовуються і для її легування в залежності від складу і поставлених вимог замовника до металопродукції. Не зважаючи на значні успіхи науковців-дослідників, експериментальні методи визначення властивостей феросплавів, що потрібно для визначення їх технологічності при використанні, все ще залишаються досить трудомісткими та обмежені техніко-конструкційними можливостями обладнання, яке застосовується. Крім того, з огляду на хімічну та структурну мікронеоднорідність добавок, яка існує у високотемпературних надліквідусних областях, не завжди дозволяють отримати адекватні результати досліджень для подальшого аналізу. На основі основних положень концепції спрямованого хімічного зв'язку на рівні міжатомної взаємодії встановлені аналітичні вирази для прогнозування першочергових фізико-хімічних та теплофізичних властивостей марганецьвмісних феросплавів. Одержані залежності пройшли експертну оцінку на промислових даних.*

***Ключові слова:** марганецьвмісні феросплави, параметри міжатомної взаємодії, моделювання, прогноз, фізико-хімічні та теплофізичні властивості, якість сталі*

**Вступ та постановка проблеми.**

Делегування металургами - науковцями частки своїх знань, накопиченого роками досвіду, результатів експериментальних досліджень для формування інтелектуальних систем у вигляді програм прийняття управлінських рішень наскрізного аналізу чи окремих прогнозних блоків на конкретних

---

© Тогобицька Д.М., Поворотня І.Р., Піптюк В.П., Греков С.В., Кукса О.В., 2024

металургійних переділах сприяють встановленню синергетичного зв'язку науки і виробництва задля виконання єдиної місії - виготовлення високоякісного конкурентоспроможного металу.

Активність комп'ютеризації металургійної промисловості значно зросла за останні декілька десятиріч, проте існуючі додатки та спеціалізовані програмні комплекси не здатні охопити постійно зростаючі потреби споживачів і вимоги до якості, фізико - хімічних, теплофізичних, експлуатаційних властивостей, обмежень щодо вмісту елементів, а одже потребують постійного поповнення даних, що закладають основу програмного та інформаційного забезпечення, їх актуалізацію згідно сучасних уявлень та запитів. Звісно є обмеження, спрощення, що закладаються у програмах і відповідна похибка та точність результату, оскільки металургійний процес є багатофакторним, однак разом з цим з'являється простір для розробки науково обґрунтованих комплексних показників, що дозволять провести операцію «згортки» та знизити параметричність процесу. Важливу роль відіграє наявність достовірних даних, що закладають підґрунтя для адекватної роботи усіх складових потенційно розроблених систем АСУТП.

В Інституті чорної металургії активно розвивається Система Баз даних, що являються складовими банками даних «Металургія» як інформаційного фундаменту для моделювання у силеплавильному та доменному виробництві [1]. Так база даних «Феросплави» [2] включає відомості про комплекс фізико-хімічних, фізичних і теплофізичних властивостей феросплавів широкого сортаменту. За останній час база «Феросплави» поповнена даними про властивості ферохрому, фероцирконію, феронікелю, феросплавами на основі марганцю та кремнію. Інтерфейс бази даних «Феросплави» є зручним для користування та розуміння, як досвідченому користувачу так і початківцю, а пошук необхідної інформації здійснюється по кодовим словам, автору, методиці, призначенню і т.д. На основі накопиченої у ній інформації розроблений Модуль для прогнозування комплексу фізико-хімічних та теплофізичних властивостей феросплавів широкого сортаментного ряду [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Унікальність феросплавів з позицій їх впливу на спрямоване формування затребуваної структури та

властивостей металевих розплавів є досить науковим питанням, що продовжує бути у тренді протягом багатьох років. Значні успіхи у вивченні фізико-хімічних і теплофізичних характеристик промислових феросплавів досягнуті в роботах науковців та їх послідовників М.І. Гасіка, І.П. Казачкова, А.І. Строганова, В.С. Ігнат'єва, В.А. Віхлевщук, В.І. Жучкова, Н.А. Ватоліна, А.Л. Зав'ялова, С.Л. Макурова, М.В. Волощенко, В.Є. Власенка та ін. Важливість врахування температурних умов, як лімітуючої ланки в отриманні якісного та конкурентоздатного металу, відмічена у роботах А. Kagawa [4], А.А. Howe [5], G.Allan [6] та багатьох інших вчених.

У закордонних публікаціях наукова спільнота все частіше підіймає питання виробництва феросплавів у різних площинах [7-9]. Так у роботі [10], японські науковці наголошують на необхідності проведення процесу рециклінгу сталеплавильних шлаків з метою екстракції марганцю з його складу задля виготовлення у подальшому марганцевих феросплавів, у зв'язку з значним попитом на даний клас феросплавів, що забезпечить зниження його собівартості у порівнянні з класичним способом виробництва. Феросплави активно розглядають не лише у контексті легуючих добавок, але й у якості змінювачів форми, кількості та структурних складових неметалевих включень у металі, що забезпечує одержання відповідного рівня його чистоти та якості. Автори роботи [11] підійшли до питання впливу феросплавів на неметалеві включення з ідеології, що феросплави містять у собі уже неметалеві осередки, ще до введення у расплав, чим збільшують об'єм, що припадає на них. Такий підхід співпадає з уявленнями про мікронеоднорідну кластерну будову металевих розплавів. Усі ці питання зводяться до одного спільного знаменника - знання властивостей феросплавів, що є одним з ключових аспектів у вирішенні вищезгаданих задач.

Разом з тим феросплави та їх дослідження мають ряд труднощів, що спричинені їх високотемпературністю і як наслідок складнощами проведення експериментів з позицій технологічного обмеження обладнання. Саме ці фактори у значній мірі впливають на наявність іноді суперечливої інформації у літературних джерелах про першочергові властивості феросплавів та потребують їх уточнення. Одержання достовірної інформації щодо фізико-

хімічних, теплофізичних властивостей феросплавів є важливим підґрунтям для вирішення технологічних аспектів ведення плавки, зокрема питань забезпечення максимально можливого ступеню засвоєння дороговартісних добавок, енергозбереження, раціоналізації прийняття інженерних рішень та розробки нових технологічних схем одержання якісного металу.

Вирішення вказаних питань можливе за рахунок розвитку методів математичного моделювання, розробки адекватних прогнозних моделей визначення властивостей феросплавів та комп’ютерного аналізу з залученням відправних позицій будови металевих розплавів і поглиблення знань про їх фізико-хімічну індивідуальність, що допоможе наблизитись до вибору ефективної добавки та розробки нових раціональних комплексних складів феросплавів з реалізацією подальшої основної наукової мети – одержання якісного металу.

Одним з ефективних способів опису фізико-хімічної суті властивостей металевих розплавів та чисельного їх визначення, пояснення процесів протікання взаємодій між ними є концепція спрямованого хімічного зв’язку, яку заснував в Інституті чорної металургії НАН України (ІЧМ НАНУ) Приходько Е.В. [12-14]. Принципова відмінність даного підходу від загальновідомих полягає у розгляді розплаву, як хімічно єдиної системи, а не просто механічної суміші хімічних елементів та впровадженні інтегральних параметрів міжатомної взаємодії у нерозривному ланцюгові «склад – технологія – структура – властивості». Згідно відправних положень концепції спрямованого хімічного зв’язку: хімічна індивідуальність системи, реакційна здатність, структурний стан розплавів виражаються за допомогою методу кодування хімічного складу дослідного розплаву в інтегральних параметрах міжатомної взаємодії:  $Z^Y$  – параметр зарядового стану системи,  $e$ ;  $d$  – середньозважена між’ядерна відстань,  $10^{-1}\text{нм}$ ;  $\text{tg}\alpha$  – константа для кожного елемента, яка характеризує градієнт зміни радіусу іона при зміні його заряду;  $\rho_1$  – спрямована зарядова щільність,  $e/\text{нм}$ .

Ефективність даного методу у вирішенні нагальних питань металургійної галузі підтверджена багатолітнім досвідом та плідною співпрацею ІЧМ НАНУ з провідними підприємствами України на яких впроваджено ряд розроблених

технологічних управляючих рішень спрямованих на покращення якості сталі, а також новітніми розробками по грантовим напрямкам наукової діяльності [2, 15-17].

**Мета роботи** – експертна оцінка комплексу властивостей марганецьвмісних феросплавів вітчизняного виробництва задля одержання конкурентоздатного металу.

**Результати та основний матеріал дослідження.** Основні фізико-хімічні властивості феросплавів це температура плавлення ( $T_p, ^\circ\text{C}$ ), щільність ( $D \cdot 10^3, \text{кг/м}^3$ ) і теплофізичні характеристики (теплопровідність -  $\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$ ; теплоємність -  $C, \text{Дж/кг}\cdot\text{К}$ ; теплота плавлення -  $Q_{\text{пл}}, \text{кДж/кг}$ ; питомий електроопір -  $\rho, \text{мОм}\cdot\text{м}$ ; тимчасовий опір -  $\sigma, \text{МПа}$ ). З метою оцінки термічного впливу феросплавів, які вводять в сталеплавильну піч, ківш в залежності від технологічної карти ведення конкретного процесу виробництва важливо знати температуру їх плавлення. Підбір феросплаву бажано здійснювати з максимально близькою температурою плавлення до температури розплаву металу, щоб уникнути охолодження металу внаслідок присадки добавки та досягти повноцінного її розплавлення без залишків твердої породи, що сприятиме підвищенню її засвоєння. У довідковій літературі температура плавлення феросплавів наводиться або одним значенням, або діапазоном температурного інтервалу плавлення.

Знання щільності, як важливої структурно-чутливої характеристики феросплавів дозволяє науково-обґрунтовано підходити до вибору цільової добавки, що вводять в метал, а також регулювати іонообмінні і тепло-масообмінні процеси в системі «метал-шлак-добавка». Особлива цінність для ефективного використання добавки є виконання наступної умови:  $D_{\text{металу}} \geq D_{\text{добавки}} \geq D_{\text{шлаку}}$ , що сприяє достатньому зануренню добавок у глибину металу та захисту від окислення атмосферою. Наглядність та значимість дотримання вказаної умови зображена на рис.1. При введенні в рідкий метал шматка важкого феросплаву він поступово осідає на дно і повільно розчиняється (А). Шматок легкого феросплаву при введенні в об'єм сталі спливає на поверхню та інтенсивно окислюється, що призводить до значної втрати провідного елемента (Г, Д). Добавка з раціональною щільністю повністю залучається до

гідродинамічних потоків і циркулює в об'ємі ванни, внаслідок чого відбувається швидше й повніше засвоєння корисного елементу феросплаву та його рівномірний розподіл у об'ємі металу (Б). Таким чином, значення раціональної щільності феросплаву має конкретні межі, які пов'язані з рухом його шматків в розплав. Базуючись на багатолітньому досвіді експериментальних та теоретичних досліджень, промисловій практиці провідних фахівців галузі [18-22] в металургійних колах встановилась думка, що величина раціональної щільності при введенні в металевий розплав знаходиться в межах від 5000 до 7000 кг/м<sup>3</sup> в залежності від складу феросплаву, що вводиться. При щільності рідкого напівпродукту 7000 кг/м<sup>3</sup>, якщо феросплав має густину більшу ніж 7000 кг/м<sup>3</sup>, він належить до групи важких, а якщо його щільність менше 5000 кг/м<sup>3</sup> - до групи легких.

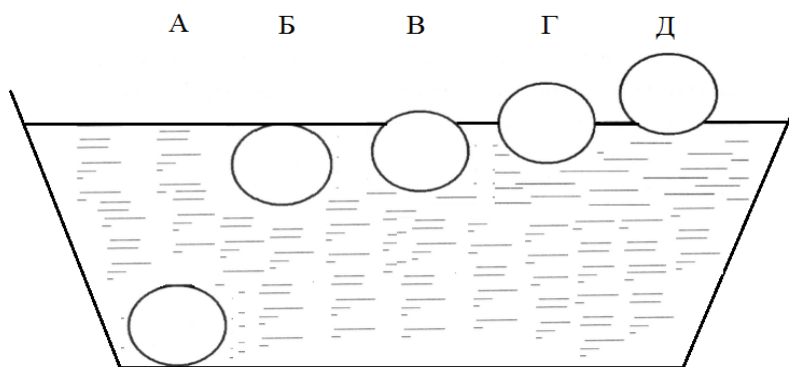


Рисунок 1 – Фіксоване (статичне) положення шматка феросплаву в залізовуглецевому розплаві у залежності від його щільності: А - 7500 кг/м<sup>3</sup>, Б - 7000 кг/м<sup>3</sup>, В - 5000 кг/м<sup>3</sup>, Г - 3500 кг/м<sup>3</sup>, Д - 2000 кг/м<sup>3</sup> згідно даних [22]

Теплопровідність ( $\lambda$ , Вт/м·К) – це здатність передавати тепло від більш нагрітих ділянок до менш нагрітих. Теплоємність (здатність поглинати тепло) феросплаву ( $C$ , Дж/кг·К), яка відображає кількість тепла, що витрачається на його нагрівання повинна забезпечувати мінімальне охолодження рідкої сталі при його введенні. Теплота плавлення ( $Q_{пл}$ , кДж/кг) – кількість теплоти, яку необхідно надати речовині в рівноважному ізобарно-ізотермічному процесі, щоб перевести її із твердого кристалічного стану в рідкий при температурі плавлення, або ж кількість теплоти, що виділяється при кристалізації

речовини. Ці теплофізичні величини характеризують теплоінерційність речовин, здатність сприймати або віддавати теплоту, тому мають важливе значення в процесах, пов'язаних з їх нагріванням та відповідно з розплавленням й засвоєнням феросплавів.

Сучасні інформаційні технології - це ефективний засіб вирішення багатопланових завдань спрямованих на поліпшення якості металопродукції, що активно використовуються в відділі фізико-хімічних проблем металургійних процесів ІЧМ НАНУ, що зокрема відображений у створених базах даних, які формують банк даних «Металургія» та містять інформацію про вказані вище фізико-хімічні, теплофізичні властивості металевих розплавів. Нещодавно база даних «Феросплави» була поповнена новими цінними промисловими даними заводу «А» щодо властивостей феромарганцю ФМн78 та феросилікомарганцю МнС17, що активно використовуються у вітчизняному виробництві\*. Проведено аналіз початкової наскрізної вибірки промислових даних, що налічує 14 554 плавок на відповідність вимогам ДСТУ 3547-97 для марки ФМн78 та ДСТУ 3548-97 для МнС17 (табл.1) [23]. У результаті співставлення масиву до вимог ДСТУ відібрано 1199 плавок для подальшого аналізу ФМн78 після процедури сортування, а решта даних по хімічному складу віднесені до феросплаву феросилікомарганцю марки МнС17. Кількість плавок з ненормованим вмістом елементів, що відхиляється від стандартів за вказаними марками феросплавів наведено на рис.2. Більша кількість плавок з відхиленням від норм спостерігається за хімічним складом феросплаву МнС17 на відміну від ФМн78.

Таблиця 1

Вимоги до вмісту марганецьвмісних феросплавів

ДСТУ	Марка	Mn, %	C, %	Si, %	P, %	S, %
3548-97	МнС17	> 65,0	<2,5	15,0-20,0	< 0,6	< 0,03
3547-97	ФМн78	75,0-82,0	< 7,0	< 6,0	< 0,7	< 0,03

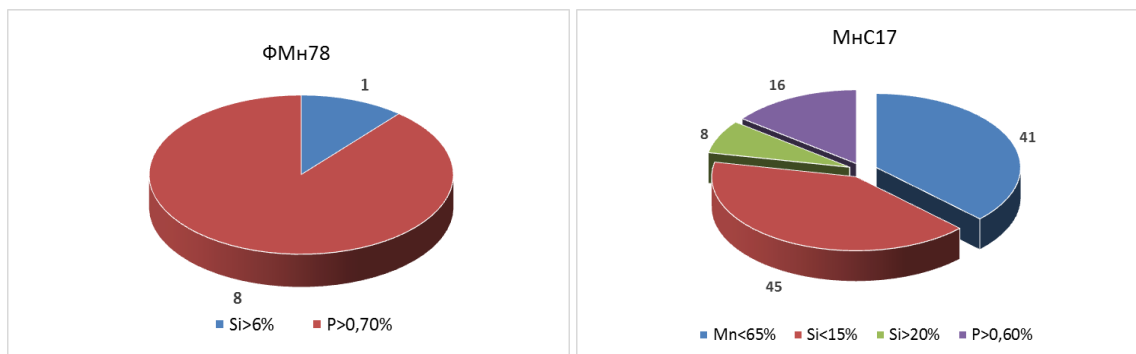


Рисунок 2 – Кількість плавок з відхиленням від ДСТУ для марганецьвмісних феросплавів досліджуваної вибірки даних вітчизняного виробництва

Властивості феросплавів були розраховані за розробленими формулами з точністю прогнозу  $R^2 \geq 0.9$ , які мають таку структуру:  $T_{пл} = f(Z^Y, \rho_l, \text{tg } \alpha)$ ;  $D = f(Z^Y, \text{tg } \alpha, \Delta d, Zc^{Mn})$ ;  $Ств = f(\Delta d, Z^Y, Zc^{Mn})$ ;  $\lambda = f(Z^Y, \text{tg } \alpha, d)$ ;  $Q_{пл} = f(Z^Y, \text{tg } \alpha, \Delta d)$ ;  $\rho = f(Z^Y, \text{tg } \alpha, \frac{Zc^{Mn}}{Zc^C})$ ;  $\sigma = f(Z^Y, \Delta d, \text{tg } \alpha, Zc^{Mn})$ , де  $Zc^{Mn}$  та  $Zc^C$  – відповідно середні заряди марганцю та вуглецю в розплаві феросплаву;  $\Delta d$  – параметр хімічної неоднорідності.

Слід зазначити, що одержана розрахункова інформація про першочергові властивості феросплавів дає можливість теоретично спрогнозувати та науково обґрунтувати вірогідний хід процесу. Про ефективність використання феромарганцю у реальному металургійному процесі можна судити у конкретному випадку його застосування для виготовлення заданої марки сталі. Конкретизація залежностей типу «властивість – параметр міжатомної взаємодії», а саме їх спрямованості можлива за рахунок покомпонентного аналізу впливу складових хімічного складу феросплаву. Аналіз впливу покомпонентності можна здійснювати за двома напрямками, а саме у тандемі з властивостями феросплаву або ж у координатах «покомпонентність – параметри міжатомної взаємодії».

Покомпонентність визначає лідируючий вплив певної складової хімічного складу, у той час, як параметри міжатомної взаємодії є результуючою дією усього хімічного складу. Нижче наведено вплив складових елементів феромарганцю на параметри міжатомної взаємодії при зведенні їх до відрізка у діапазоні  $[0 \div 1]$ . Суттєвий вплив на зміну чисельних показників параметрів



міжатомної взаємодії здійснює трійка елементів – вуглець, кремній та марганець, як провідні складові матричної підсистеми, що формують структурний каркас феросплаву (рис.3). Збільшити зарядовий стан системи розплаву феромарганцю можна завдяки кремнію, а понизити вуглецем та марганцем. Аналогічний вплив елементів зберігся і для середньозваженої між'ядерної відстані, проте зв'язок з марганцем має менш чіткий напрям та характеризується значним розкидом даних. Спрямовану зарядову щільність суттєво можна змінити у сторону збільшення в даному класі феросплавів при зміні вмісту вуглецю та марганцю за рахунок колективізації електронів партнерів зв'язку. А ось градієнт зміни радіусу іона від його заряду не корелює зі зміною вмісту марганцю та навпаки регулюється вуглецем і кремнієм. На рис. 3 спостерігається перетин даних для вуглецю та кремнію, що вірогідно свідчить про необхідність застосування їх співвідношень у якості показника задля спрямованого корегування числових значень властивостей феросплаву. Зпівставлення поведінки елементів хімічного складу феросплаву ФМн78 наведених на рис.3 з закладеними в структуру моделей параметрами міжатомної взаємодії вказує на прийняття конкретних рішень, щодо підвищення комплексу властивостей розплаву.

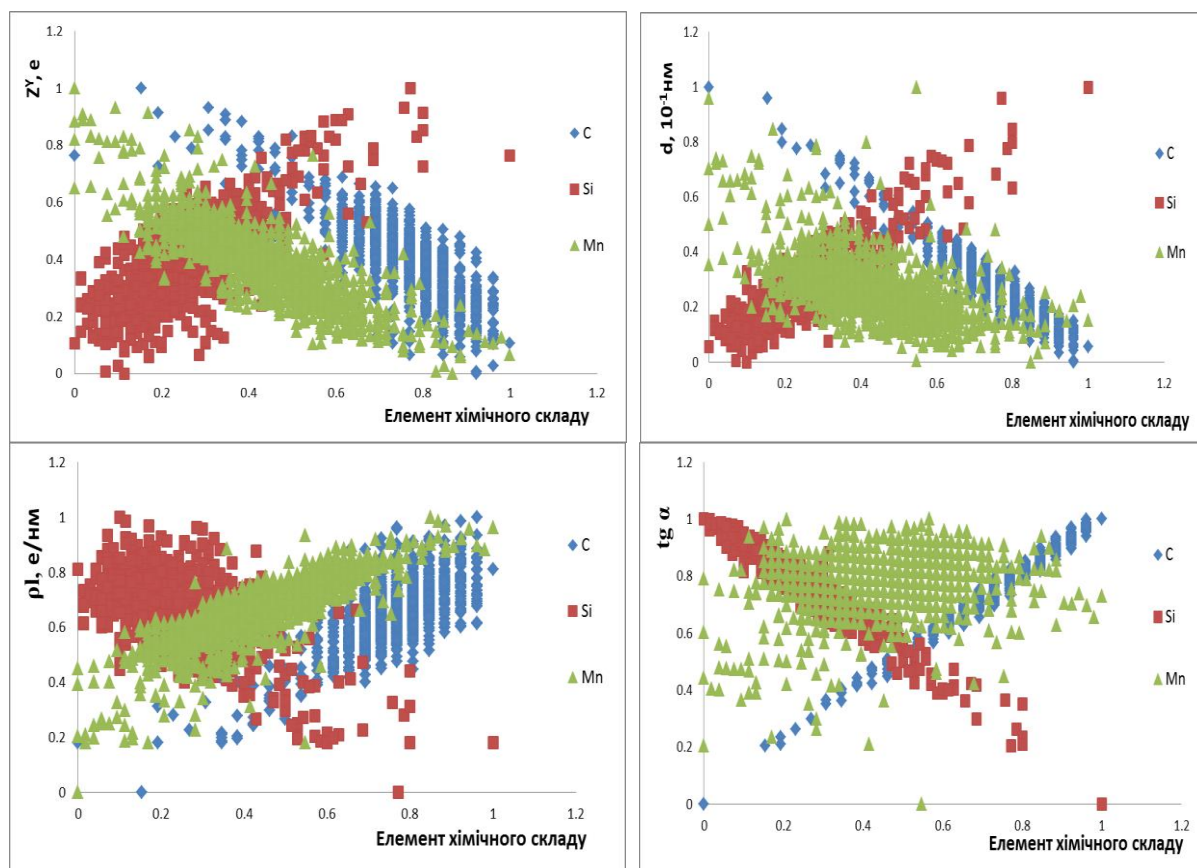


Рисунок 3 – Вплив хімічного складу ФМн78 на зміну параметрів міжатомної взаємодії феромарганцю

Тісний взаємозв'язок щільності спостерігається на рис.4 з вуглецем ( $R^2=0.87$ ) та кремнієм ( $R^2=0.84$ ) на що вплинула фізико-хімічна ідентичність хімічних елементів та їх реакційна здатність по відношенню до партнерів міжатомного зв'язку у феросплаві. Вказані елементи зменшують між'ядерну відстань, а отже підвищують показники щільності за рахунок утворення міцних міжатомних зв'язків. Натомість з марганцем менш тісний зв'язок ( $R^2=0.35$ ), проте є області, де прослідковується значний вплив при прицільному розгляді та відсіюванні частки вибірки даних.

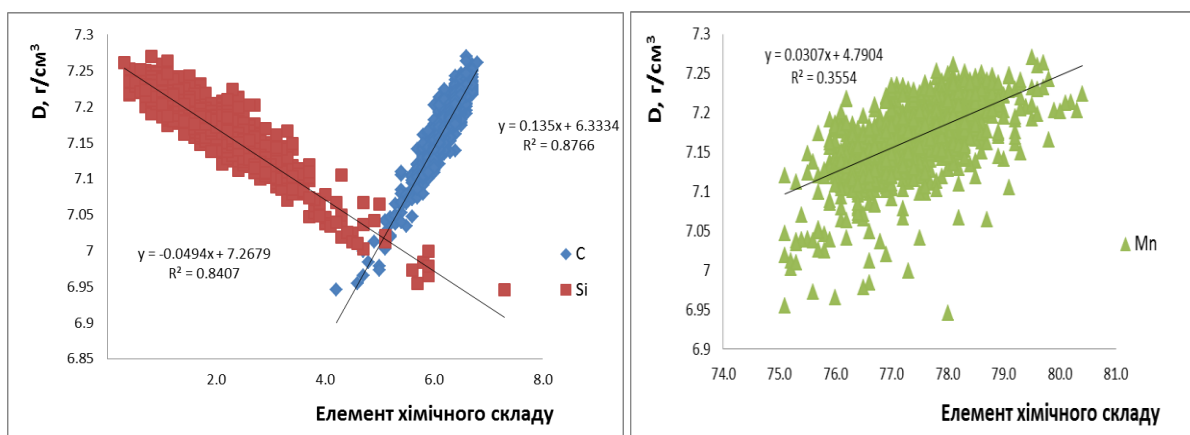


Рисунок 4 – Фрагменти взаємозалежності розрахованих властивостей феромарганцю (ФМн78) з елементами його хімічного складу

На рис.5 представлені результати прогнозування властивостей марганецьвмісних феросплавів для усієї вибірки даних та плавок, що мають ненормований вміст хімічних елементів, зокрема щільності та температури плавлення. Аналіз рис.5 показує, що масив характеризується рівномірністю та навіть викиди знаходяться у межах сформованих залежностей. Результати розрахункових значень щільності рис.5 корелюють з даними рис.1, де вказано раціональний діапазон зміни показників щільності, що створює засади на користь ймовірного їх використання, оскільки забезпечується необхідний рівень властивостей феросплавів. Збільшення середнього заряду марганцю ( $Z^{\wedge}Mn$ ) у розплаві феросплавів призводить до зростання температури його плавлення, що слід враховувати при використанні феросплавів з підвищеним вмістом марганцю.

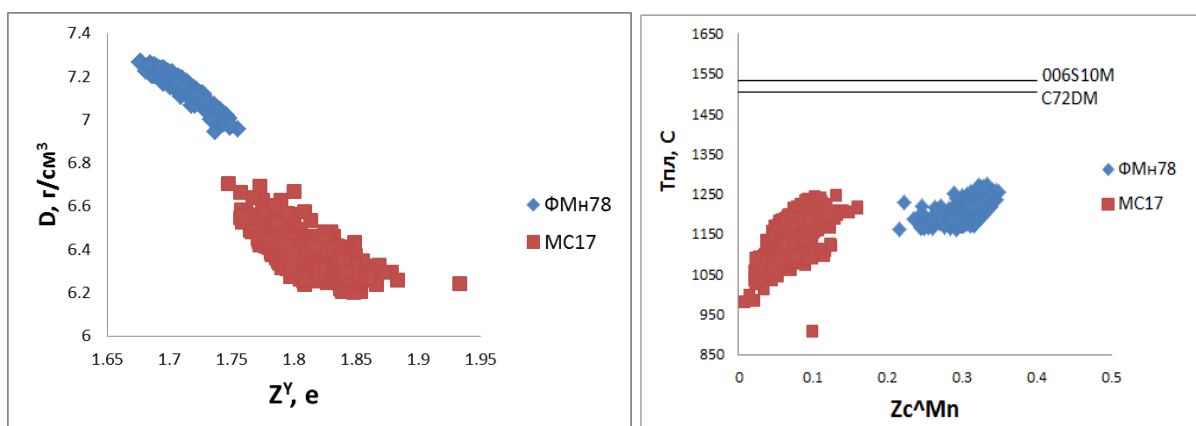


Рисунок 5 – Залежність розрахованих значень властивостей для марганецьвмісних феросплавів

На рис.5 нанесені середні значення температури плавлення, що розраховані по моделям роботи [24] для двох марок сталей, а саме С72DM та 006S10M. Оскільки температури плавлення сталей значно вищі за  $T_{пл}$  досліджуваних феросплавів, потенційно їх можна використовувати для доведення за хімічним складом при позапічній обробці вказаних марок сталей, адже виконується головна лімітуюча умова  $T_{пл} \text{ сталі} \geq T_{пл} \text{ феросплаву}$ , що сприяє швидкому розплавленню зокрема марганецьвмісних феросплавів (ФМн78 та МнС17), а отже і їх засвоєнню.

### Висновки

Виконаний статистичний аналіз репрезентативної вибірки хімічного складу накопичених в Банку даних «Металургія» промислових марганецьвмісних феросплавів ( $n = 14554$ ) та запропоновані на рівні міжатомної взаємодії аналітичні вирази для оцінки їх фізико-хімічних та теплофізичних властивостей. Показано, що аналіз хімічного складу феросплаву, тільки з позицій дотримання норм стандарту за хімічним складом не є інформативним та недостатній для оцінки технологічного спрямування його використання.

Представлений комплекс розроблених аналітичних виразів для прогнозування важливих фізико-хімічних та теплофізичних властивостей з високою точністю ( $R^2 \geq 0.9$ ) дозволить створити засади ефективного використання навіть не зовсім функціонального (технологічного) за хімічним складом феросплаву. Саме оцінка з огляду на забезпечення затребуваного рівня властивостей надає достовірні дані для прийняття управлінських (раціональних технологічних) рішень виробництва конкурентоздатного металу. В роботі показано, що використання відповідно до експертної оцінки на основі запропонованих моделей вітчизняні марганецьвмісні феросплави в розглянутих діапазонах складу можливе за їх призначенням з дотриманням певних умов. Додатковий розгляд і оцінка цього питання дозволили констатувати можливість використання вітчизняних феросплавів марок ФМн78 та МнС17 з вказаними відхиленнями по хімічному складу при виробництві сталі масового призначення.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Тогобицька Д.М. Банк даних «Металургія» – інформаційна основа прогнозування властивостей фізико-хімічних систем та їх розплавів // Д.М. Тогобицька, Д.О. Степаненко, А.І. Белькова, А.П. Петров, Ю.М. Ліхачев. – «Сучасні проблеми металургії». – 2021. – № 24. – С. 140 – 148.
2. Тогобицька Д.М. Бази даних і моделі для експертного оцінювання ефективності використання феросплавів під час виробництва сталі / Тогобицька Д.М., Піптюк В.П., Петров А.Ф., Греков С.В., Снігура І.Р., Ліхачов Ю.М., Головка Л.А. // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. 2017. - № 31. - С. 150 - 165.
3. Піптюк В.П. Перспективи генерації феросплавів нового покоління для легування та мікролегування сталі / Піптюк В.П., Тогобицька Д.М., Логозинський І.М., Левин Б.А., Петров О.П., Греков С.В., Снігура І.Р. // – Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 4 (117). – Дніпро, 2018. – С. 52 – 60.
4. A. Kagawa, T. Okamoto. Influence of alloying elements on temperature and composition for peritectic reaction in plain carbon steels. *Materials Science and Technology*. October 1986. Vol. 2. P. 997 – 1008.
5. Howe A. A. Estimation of liquidus temperatures for steels / A/ A/ Howe // *Ironmaking and Steelmaking/* - 1988. – V. 15. - № 3. – P. 134 – 142.
6. G. ALLAN: «Castability, solidification mode and residual ferrite distribution in highly alloyed stainless steels», ECSC research project, EUR13941, European Communities, Luxembourg 1997.
7. KALENGA WA KALENGA, M. (2021). The challenges in the High Carbon Ferromanganese industry and prospects. *METAL Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4087>
8. Wang, Weisheng et al. “Effect of ferromanganese additions on non-metallic inclusion characteristics in TRIP steel.” *Journal of Iron and Steel Research International* 29 (2022): 1464 - 1473. <https://doi.org/10.1007/s42243-022-00768-6>
9. Y. Bi, A. Karasev & P. G. Jönsson (2014) Investigations of inclusions in ferrochromium alloys, *Ironmaking & Steelmaking*, 41:10, 756-762, DOI: 10.1179/1743281214Y.0000000192
10. Kim, S. J., Shibata, H., Kitamura, S. Y., & Yamaguchi, K. (2020). Novel technology to produce ferromanganese alloy from Steelmaking slag. In *Proceedings of INFACON XIII - 13th International Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry* (pp. 655-662).
11. M. M. Pande, M. Guo, X. Guo, D. Geysen, S. Devisscher, B. Blanpain & P Wollants (2010) Ferroalloy quality and steel cleanliness, *Ironmaking & Steelmaking*, 37:7, 502-511, DOI: 10.1179/030192310X12700328925787
12. Приходько Е.В. Эффективность комплексного легування сталей і сплавів. - К.: Наукова думка, 1995. - 292с.
13. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters // *Lithuanian Journal of Physics*. Vol.64, No.1, pp.58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>
14. Приходько Е.В. Металохімія багатокомпонентних систем. - М.: Металургія. - 1995. - 320 с.
15. Бабаченко О.І. Оптимізація хімічного складу сталі для залізничних коліс, що забезпечує стабілізацію механічних і підвищення експлуатаційних властивостей // Бабаченко О.І., Тогобицька Д.М., Козачек А.С., Кононенко О.О., Книш О.В., Снігура І.Р. - Металургійна та гірничорудна промисловість. - 2016. - № 2. - С. 67 - 73.

16. Togobitskaya D.N. Prediction of Ferroalloy Properties for Expert Evaluation of the Efficiency of their Use During Addition to Steel in a Ladle Furnace Unit / Togobitskaya D.N., Pipyuk V.P., Petrov A.F., Grekov E.V., Mirgorodskaya A.S. //Metallurgist. – 2019. Vol 62. No (11-12). pp. 1115-1122.
17. Піптюк В.П. Експериментальне дослідження підвищення технологічності брикетів феросиліцію для виробництва сталі /В.П. Піптюк, Д.М. Тогобицька, К.В. Баюл, І.М. Логозинський, Б.А. Левін, О.П. Петров, С.В. Греков, Г.О. Андрієвський //Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. –Дніпро. - 2018. - №21. – Вип. 1. –С.50-55.
18. Тогобицька Д.М. Прогнозування властивостей феросплавів для експертної оцінки ефективності їх використання під час доведення сталі на УКП/ Тогобицька Д.М., Піптюк В.П., Петров О.Ф., Греков С.В., Миргородська А.С. // Металург. 2018. - № 11. - С. 27 - 32.
19. Казачков І.П. Фактори, що визначають швидкість розчинення сплавів у рідкій сталі /І.П. Казачков, І.Б. Паримончик // Металургія і коксохімія. -1976. -49. -С. 56-59.
20. Лозова О.Ю. Вивчення впливу технологічних факторів на час плавлення крем'янистих феросплавів у рідкому металі. / Лозова О.Ю., Жучков В.І., Некрасов О.В. // Розплави. - 2001. -№3. - С.11-17.
21. Гасик М.І. Фізикохімія і технологія електроферосплавів / М.І. Гасик, М.П. Лякишев. - Дніпропетровськ: ДНВП «Системні технології». - 2005. 448 с.
22. Грищенко С.Г. Феросплавна промисловість світу та України у 2014-2015 роках. / С.Г. Грищенко, В.С. Куцин, П.А. Кравченко, С.Л. Кудрявцев // Сучасні проблеми металургії. 2016. - Т.19. - В.1. - С. 279 - 285.
23. Піптюк В.П., Степаненко Д.О., Греков С.В., Ходотова Н.Є. Оцінка можливості використання по прямому призначенню марганцевих феросплавів вітчизняного виробництва з відхиленнями по хімічному складу. Всеукраїнська науково-технічна конференція «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ». - 2022. - С.19 - 20.
24. Д.М. Тогобицька, І.Р. Снігура, В.П. Піптюк, С.В. Греков Новий підхід до вирішення проблеми спрямованого формування кінцевих розплавів при доведенні сталі на установці «ківш-піч» // «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Вип. 35. – С. 296 – 309. (In Ukrainian).

#### REFERENCES

1. Togobytska D.M. Data bank "Metallurgy" - an information base for forecasting the properties of physico-chemical systems and their melts // D.M. Togobytska, D.O. Stepanenko, A.I. Belkova, A.P. Petrov, Yu.M. Likhachev. - "Modern problems of metallurgy". – 2021. – No. 24. – P. 140 – 148.
2. Togobytskaya D.N. Databases and models for expert evaluation of the efficiency of ferroalloys in steel production / Togobytskaya D.N., Pipyuk V.P., Petrov A.F., Grekov S.V., Snygura I.R., Lykhachev Yu.M. L.A. Golovko // Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. 2017. – No. 31. – P. 150 – 165.
3. Pipyuk V.P. Prospects for the generation of new generation ferroalloys for steel alloying and microalloying / V.P. Pipyuk, D.M. Togobytska, I.M. Logozynskyi, B.A. Levin, O.P. Petrov, S.V. Grekov, I. Snigura. R. // – System technologies. Regional interuniversity collection of scientific works. – Issue 4 (117). - Dnipro, 2018. - P. 52 - 60.
4. A. Kagawa, T. Okamoto. Influence of alloying elements on temperature and composition for peritectic reaction in plain carbon steels. Materials Science and Technology. October 1986. Vol. 2. P. 997 – 1008.
5. Howe A. A. Estimation of liquidus temperatures for steels / A/ A/ Howe // Ironmaking and Steelmaking/ - 1988. – V. 15. - № 3. – P. 134 – 142.

6. G. ALLAN: «Castability, solidification mode and residual ferrite distribution in highly alloyed stainless steels», ECSC research project, EUR13941, European Communities, Luxembourg 1997.
7. KALENGA WA KALENGA, M. (2021). The challenges in the High Carbon Ferromanganese industry and prospects. METAL Conference Proceedings. <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4087>
8. Wang, Weisheng et al. “Effect of ferromanganese additions on non-metallic inclusion characteristics in TRIP steel.” *Journal of Iron and Steel Research International* 29 (2022): 1464 - 1473. <https://doi.org/10.1007/s42243-022-00768-6>
9. Y. Bi, A. Karasev & P. G. Jönsson (2014) Investigations of inclusions in ferrochromium alloys, *Ironmaking & Steelmaking*, 41:10, 756-762, DOI: 10.1179/1743281214Y.0000000192
10. Kim, S. J., Shibata, H., Kitamura, S. Y., & Yamaguchi, K. (2020). Novel technology to produce ferromanganese alloy from Steelmaking slag. In *Proceedings of INFACON XIII - 13th International Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry* (pp. 655-662).
11. M. M. Pande, M. Guo, X. Guo, D. Geysen, S. Devisscher, B. Blanpain & P Wollants (2010) Ferroalloy quality and steel cleanliness, *Ironmaking & Steelmaking*, 37:7, 502-511, DOI: 10.1179/030192310X12700328925787
12. Prikhodko E.V. Effectiveness of complex alloying of steels and alloys. - K.: Naukova dumka, 1995. - 292p.
13. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters // *Lithuanian Journal of Physics*. Vol.64, No.1, pp.58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>
14. Prikhodko E.V. Metallochemistry of multicomponent systems. - M.: Metallurgy. - 1995. - 320 p.
15. Babachenko A.I. Optimizing the chemical composition of steel for railway wheels, which provides stabilization of mechanical and increased operational properties // Babachenko A.Y., Togobytskaya D.N., Kozachek A.S., Kononenko A.A., Knysh A.V., Snigura I.R. - *Metallurgical and mining industry*. - 2016. - No. 2. - P. 67 - 73.
16. Togobitskaya D.N. Prediction of Ferroalloy Properties for Expert Evaluation of the Efficiency of their Use During Addition to Steel in a Ladle Furnace Unit / Togobitskaya D.N., Piptyuk V.P., Petrov A.F., Grekov E.V., Mirgorodskaya A.S. // *Metallurgist*. - 2019. Vol 62. No (11-12). pp. 1115-1122.
17. Piptyuk V.P. Experimental study of improving the manufacturability of ferrosilicon briquettes for steel production / V.P. Piptyuk, D.M. Togobytska, K.V. Bayul, I.M. Logozytskyi, B.A. Levin, O.P. Petrov, S.V. Grekov, G.O. Andrievsky // *Modern problems of metallurgy. Scientific news*. - Dnipro. - 2018. - No. 21. - Issue 1. - P.50-55.
18. Togobytskaya D.N. Forecasting of the properties of ferroalloys for expert assessment of the effectiveness of their use in finishing steel at UCP/ Togobytskaya D.N., Pyptyuk V.P., Petrov A.F., Grekov S.V., Myrhorodskaya A.S. // *Metallurgist*. 2018. - No. 11. - P. 27 - 32.
19. Kazachkov I.P. Factors determining the dissolution rate of alloys in liquid steel / I.P. Kazachkov, I.B. Parimonchik // *Metallurgy and coke chemistry*. -1976. -49. -WITH. 56-59.
20. Lozovaya E.Yu. Study of the influence of technological factors on the melting time of siliceous ferroalloys in liquid metal. / Lozovaya E.Yu., Zhuchkov V.Y., Nekrasov A.V. // *Melts*. -2001. - No. 3. - P.11-17.
21. Gasik M.I. Physical chemistry and technology of electroferroalloys / M.I. Gasik, N.P. Lyakishev. - Dnepropetrovsk: State Research and Production Enterprise “System Technologies”. - 2005. 448 p.

22. Grishchenko S.G. Ferroalloy industry of the world and Ukraine in 2014-2015. / S.G. Grishchenko, V.S. Kutsin, P.A. Kravchenko, S.L. Kudryavtsev // Current problems of metallurgy. 2016. – Т.19. – В.1. – P. 279 – 285.
23. Pityuk V.P., Stepanenko D.O., Grekov S.V., Khodotova N.Ye. Assessment of the viability of vicorization based on the direct assessment of manganese ferroalloys of ham production with additives in the chemical warehouse. All-Ukrainian scientific and technical conference “SCIENCE AND METALURGY”. - 2022. - P.19 - 20.
24. D.M. Togobitska, I.R. Snigura, V.P. Pityuk, S.V. Grekov A new approach to the current problem of direct forming of end melts when steel is finished at the "bucket-furnace" installation // "Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy." – 2021. – VIP. 35. – pp. 296 – 309. (In Ukrainian).

Received 11.02.2024.

Accepted 16.03.2024.

UDC 669.02/09:669.168:669.15’74-198..003.12

D.Togobitska, I.Povorotnia, V.Piptiuk, S.Grekov, O.Kuksa

**EXPERT SYSTEM OF ASSESSMENT OF PHYSICOCHEMICAL AND  
THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF  
MANGANESE-CONTAINING FERROALLOYS**

The uniqueness of ferroalloys from the point of view of their influence on the targeted formation of the desired structure and properties of metal melts is a rather scientific question that continues to be in trend for many years. Significant progress in the study of physicochemical and thermophysical characteristics of industrial ferroalloys has been achieved by both domestic and foreign scientists. At the same time, ferroalloys and their research have a number of difficulties caused by their high temperature and, as a result, the difficulties of conducting experiments from the standpoint of technological equipment limitations. It is these factors that significantly affect the availability of sometimes contradictory information in literary sources about the primary properties of ferroalloys and require their clarification. Given the demand for reliable data, the Institute of Ferrous Metallurgy is actively developing the Database System, which is a component of the "Metallurgy" data bank as an information foundation for modeling in smelting and blast furnace production. The purpose of the work is an expert assessment of the complex properties of domestically produced manganese-containing ferroalloys in order to obtain a competitive metal. One of the effective methods of describing the physical and chemical nature of the properties of metal melts and their numerical determination, explaining the processes of interactions between them is the concept of directed chemical bonding, which was founded by E.V. Prikhodko at the Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National



Academy of Sciences of Ukraine. Based on its postulates, the main physicochemical properties of ferroalloys are considered: melting temperature, density, and thermophysical characteristics (thermal conductivity; heat capacity; heat of fusion; specific electrical resistance; temporary resistance). A statistical analysis of a representative sample of the chemical composition of industrial manganese-containing ferroalloys accumulated in the "Metallurgy" Data Bank was performed and analytical expressions for evaluating their physicochemical and thermophysical properties were proposed at the level of interatomic interaction. It is shown that the analysis of the chemical composition of the ferroalloy, only from the standpoint of compliance with the standards of the chemical composition, is not informative and insufficient for assessing the technological direction of its use. The presented complex of developed analytical expressions for predicting important physicochemical and thermophysical properties with high accuracy ( $R^2 \geq 0.9$ ) will allow to create the principles of effective use of even a not quite functional (technological) ferroalloy in terms of its chemical composition. It is the assessment with a view to ensuring the required level of properties that provides reliable data for making management (rational technological) decisions for the production of competitive metal. The work shows that the use of domestic manganese-containing ferroalloys in the considered ranges of composition is possible according to their purpose, subject to certain conditions, according to an expert assessment based on the proposed models. Additional consideration and assessment of this issue made it possible to state the possibility of using domestic manganese-containing ferroalloys with the specified deviations in chemical composition in the production of mass steel.

**Keywords:** manganese-containing ferroalloys, parameters of interatomic interaction, modeling, forecasting, physical, chemical and thermal properties, steel quality

**Дар'я Миколаївна Тогобицька** – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України

**Ірина Романівна Поворотня** – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України

**Віталій Петрович Піптюк** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу фізико-технічних проблем металургії сталі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України

**Станіслав Вікторович Греков** – науковий співробітник відділу фізико-технічних проблем металургії сталі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України

**Олег Володимирович Кукса** – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України

**Daria Togobitska** – doctor of technical sciences, professor, leading researcher of the department of physical and chemical problems of metallurgical processes in Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

**Iryna Povorotnia** – candidate of technical sciences, researcher of the department of physical and chemical problems of metallurgical processes in Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

**Vitaliy Pipyuk** – candidate of technical sciences, senior researcher of the department of physical and technical problems of steel metallurgy in Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

**Stanislav Grekov** – researcher of the department of physical and technical problems of steel metallurgy in Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

**Oleg Kuksa** – candidate of technical sciences, researcher of the department of physical and chemical problems of metallurgical processes in Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine