

Zhdaniuk, N. V. (2024). Study of the phenomenon of magnetism in iron-containing silicates glasses. *Actual Issues of Modern Science. European Scientific e-Journal*, 32, __-__. Ostrava: Tuculart Edition, European Institute for Innovation Development. (In Ukrainian)

DOI: 10.47451/inn2024-08-01

The paper is published in Crossref, ICI Copernicus, BASE, Zenodo, OpenAIRE, LORY, Academic Resource Index ResearchBib, J-Gate, ISI International Scientific Indexing, ADL, JournalsPedia, Scilit, EBSCO, Mendeley, and WebArchive databases.



Nataliia V. Zhdaniuk, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Senior Lecturer, Department of Chemical Technology of Ceramics and Glass, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. Kyiv, Ukraine.
ORCID: 0000-0003-3771-5045, Scopus: 57201323575.

Study of the phenomenon of magnetism in iron-containing silicates glasses

Abstract: Studying the structure and properties of iron-containing glass-crystalline materials is an urgent task, as it makes it possible to develop glass compositions with high magnetic properties. The study subject is the structure and magnetic properties of iron-containing silicate glasses of the $\text{SiO}_2\text{-FeO-CaO}$ system in the presence of MgO , Al_2O_3 . The study object is the structure and magnetic properties of iron-containing silicate glasses. The purpose is to obtain silicate glasses with a high content of iron oxides and study their properties. The methods of DTA and X-ray phase analysis were used to study the materials and the relative quality factor and magnetic permeability of the glass were determined using a Q-meter. The phase diagrams of systems containing oxides SiO_2 , FeO , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Al_2O_3 , B_2O_3 , K_2O and selected compositions corresponding to the minimum eutectic temperatures were analyzed. The studies were based on the works of N. Wojcik, A. Paladino, A., S. Zhang, M., Yu. Ebisawa, M. Plemyanikov and other scientists. The glass was synthesized at a temperature of 1300°C for 2 hours. The resulting glass was crystallized by slowly increasing the temperature in the range of $550\text{-}800^\circ\text{C}$ for 3 hours. The results of differential thermal analysis confirmed the tendency of certain glass compositions to crystallize. According to the results of X-ray phase analysis, the formation of magnetite, which is a ferromagnet, was confirmed. Studies of the relative quality factor and magnetic permeability of glasses confirmed the presence of magnetic properties of the obtained samples. These results are consistent with theoretical studies of system state diagrams and the results of instrumental analysis methods.

Keywords: state diagram, glass, iron oxides, crystallization, magnetism; magnetite.



Наталія В. Жданюк, старший викладач, кафедра хімічної технології кераміки та скла, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ, Україна.
ORCID: 0000-0003-3771-5045, Scopus: 57201323575.

Вивчення явища магнетизму у залізовмісних силікатних стеклах

Анотація: Вивчення структури та властивостей залізовмісних склокристалічних матеріалів є актуальним завданням, так як дозволяє розробити склади стекол з високими магнітними властивостями. Предметом дослідження є структура і магнітні властивості залізовмісних силікатних стекол системи системи $\text{SiO}_2\text{-FeO-CaO}$ в присутності MgO , Al_2O_3 . Об'єктом

дослідження є структура та магнітні властивості залізовмісних силікатних стекел. Метою роботи є отримання силікатних стекел з підвищеним вмістом оксидів заліза та вивчення їх властивостей. Для дослідження матеріалів використано методи ДТА, РФА та визначено відносну добротність та магнітну проникність стекел за допомогою Q-метра. Були проаналізовані діаграми стану систем, що містять оксиди SiO_2 , FeO , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Al_2O_3 , V_2O_5 , K_2O та обрані склади, що відповідають мінімальним евтектичним температурам. Дослідження опиралися на праці N. Wojcik, A. Paladino, A., S. Zhang, M., Yu. Ebisawa, M. Племяннікова та інших вчених. Синтез скла проводили при температурі 1300°C протягом 2 годин. Отримане скло кристалізували шляхом повільного підвищення температур в інтервалі $550\text{--}800^\circ\text{C}$ протягом 2 годин. Результати диференціального термічного аналізу підтвердили схильність визначених складів стекел до кристалізації. За результатами рентгенофазового аналізу підтверджено утворення магнетиту, що є феримагнетиком. Дослідження відносної добротності та магнітної проникності стекел підтвердили наявність магнітних властивостей отриманих зразків. Ці результати узгоджуються з теоретичними дослідженнями діаграм стану систем та результатами інструментальних методів аналізу.

Ключові слова: діаграми стану, скло, оксиди феруму, кристалізація, магнетизм, магнетит.



Вступ

Вивчення структури та властивостей залізовмісних склокристалічних матеріалів є актуальним завданням, так як дозволяє розробити склади стекел з високими магнітними властивостями. Також, ці дослідження дозволять розширити знання щодо впливу FeO на властивості силікатних систем: $\text{SiO}_2\text{-FeO-CaO}$, $\text{SiO}_2\text{-FeO-CaO-MgO}$, $\text{SiO}_2\text{-FeO-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$.

Предметом дослідження є структура і магнітні властивості залізовмісних силікатних стекел системи системи $\text{SiO}_2\text{-FeO-CaO}$ в присутності MgO , Al_2O_3 .

Об'єктом дослідження є структура та магнітні властивості залізовмісних силікатних стекел системи $\text{SiO}_2\text{-FeO-CaO}$.

Метою роботи є отримання силікатних стекел з підвищеним вмістом оксидів заліза та вивчення їх властивостей.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- відповідно до діаграм стану систем підібрати склади стекел, що будуть мати найнижчі температури плавлення та підвищену здатність до кристалізації;
- дослідити кристалізаційну здатність отриманих стекел та допомогою диференційного термічного аналізу;
- дослідити фазовий склад отриманих зразків за допомогою рентгенофазового аналізу;
- вивчити магнітні властивості склокристалічних матеріалів, а саме магнітну магнітну проникність матеріалу.

Для дослідження матеріалів використано методи ДТА, РФА та визначено відносну добротність та магнітну проникність стекел за допомогою Q-метра.

Огляд джерел інформації

Скела, що містять оксиди феруму постійно викликають інтерес дослідників. Так як присутність даних оксидів суттєво впливає на властивості отриманого скла та

склокристалічних матеріалів. Особливості основної сировини для виготовлення промислових силікатних стекол є кварцовий пісок. Для цього матеріалу строго регламентується вміст оксидів феруму, так як навіть незначна кількість (частки відсотків) оксидів заліза призводить до небажаного забарвлення скла, а при великому вмісті заліза (до 10 і більше відсотків) скло стає непрозорим і чорним. Як виняток, такі склади можуть бути використані для виготовлення коричневої або зеленої скляної тари або лицовальні плитки чи глазури чорного кольору (*Plemiannikov & Zhdaniuk, 2023*). Коли постає проблема забарвлення прозорого скла, необхідно враховувати, що ферум може перебувати у двох валентних станах: Fe(II) та Fe(III). Так, іон Fe^{2+} має сильну смугу поглинання в ближньому інфрачервоному діапазоні, тоді як Fe^{3+} поглинає в основному в ультрафіолетовому діапазоні. Присутність FeO забарвлює скло у синій колір, а Fe_2O_3 – у жовтий. Сумісна присутність Fe(II) оксиду та Fe(III) оксиду обумовлює градації відтінків скла, що припадають на область зелених кольорів спектру (*Vercamer, 2016*). Стан термодинамічної рівноваги $FeO \leftrightarrow Fe_2O_3$ залежить в першу чергу від redox потенціалу процесу варіння, температури варіння, концентрації оксидів, хімічного складу самого скла, що потрібно враховувати при розробки складів шихти (*Plemiannikov & Zhdaniuk, 2023*).

При дослідженні властивостей стекол з високим вмістом оксидів феруму необхідно враховувати, що ці сполуки можуть виконувати двояку роль – сіткоутворювача (Fe^{+3}) та модифікатора (Fe^{+2}) (*Vercamer, 2016; Плем'янніков і Жданюк, 2021*). Тому зміщення рівноваги $Fe_2O_3 \leftrightarrow FeO$ у силікатних розплавах з високим вмістом сполук феруму суттєво впливає властивості на структуру скла. Вивчення стану рівноваги між FeO та Fe_2O_3 у розплаві, залежно від його складу та температури показало, що при підвищенні температури рівновага зміщується у бік утворення Fe(II) оксиду. При 1320-1410°C Fe(II) оксиду у розплаві міститься на 50% більше, ніж при 1230-1320°C. З підвищенням у розплаві вмісту кремнезему та глинозему рівновага реакції зміщується у сторону утворення Fe(II) оксиду, а зі збільшенням вмісту MgO – у сторону Fe(III) оксиду (*Фальковська, 1989*).

Оксиди феруму в залежності від валентного стану заліза відіграють у склі двояку роль: сіткоутворювача (Fe^{+3}) та модифікатора (Fe^{+2}) (*Vercamer, 2016; Calas & Petiau, 1983; Плем'янніков і Жданюк, 2021*). Іон Fe^{3+} знаходиться у склі в тетраедричній координації по оксигену і може заміщувати силіцій у структурі аніонів та забезпечує структурну цілісність склоподібного тіла. Крім того, збільшення концентрації Fe_2O_3 призводить до виникнення зв'язків Fe-O-Si, що вказує на деполімеризацію скляної сітки. Іон Fe^{2+} у склі має октаедричну координацію по оксигену, виступає як типовий модифікатор скла (*Ebisawa et al., 1991; Tasheva et al., 2023; Alderman et al., 2017; Peys et al., 2018*).

На хід кристалізації скла істотно впливає концентрація іонів феруму та їх окисно-відновний стан. У деяких випадках кристалізація може відбуватися самочинно. Присутність Fe^{2+} викликає кристалізацію скла швидше і суттєвіше, ніж Fe^{3+} (*Alderman et al., 2017; Wisniewski et al., 2011; Zhdaniuk & Plemiannikov, 2024*). Це пов'язано з роллю модифікатора Fe^{2+} , що зможе стимулювати кристалізацію, тоді як Fe^{3+} відіграє роль сіткоутворювача та є менш рухомим. Іони тривалентного феруму можуть утворювати магнетит, що може викристалізовуватись з силікатного розплаву при температурах нижче 1300°C. Магнетит підвищує його гетерогенність скла і збільшує його в'язкість (*Chevrel et al., 2013*).

У роботі (*Wisniewski ma in., 2011*) підтверджено, що при кристалізації залізовмісних стекол магнетиту здатен надавати склу магнітних властивостей за рахунок наявності в них кластерів або кристалів з магнітними властивостями. Крім того, у роботі (*Wisniewski ma in., 2011*) доведено, що гематит (Fe_2O_3) є первинно кристалізованою фазою, а магнетит (Fe_3O_4) є результатом фазового перетворення після первинного росту кристала. Крім того, присутність у залізовмісному силікатному розплаві MgO , сприяє утворенню крім магнетиту, магнезіофериту (MgFe_2O_4), що характеризується високими магнітними властивостями. Основним методом характеристики фаз були скануюча електронна мікроскопія (SEM) у поєднанні з дифракцією зворотного розсіювання електронів (EBSD).

Таким чином, аналіз літературних джерел підтверджує можливість зміщення хімічної рівноваги $\text{FeO} \leftrightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$ та обумовлює можливість проводити направлений синтез з метою отримання склокристалічних матеріалів, що містять магнітні наночастинки. Оксидні стекла, що містять парамагнітні включення, приваблюють увагу як матеріали, з яких можливо отримати магнітвпорядковані частинки мікроскопічних розмірів, що є одним з інноваційних напрямків сучасної фізики магнітних явищ.

Матеріали і методи

Для визначення оптимальних складів залізовмісних склокристалічних матеріалів було проаналізовано діаграми стану двокомпонентних систем $\text{SiO}_2\text{-FeO}$ та $\text{SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Аналіз діаграм стану систем свідчить про наявність легкоплавких евтектик за температур 1173°C та 1455°C, відповідно (*Рисунок 1*).

Для варки залізовмісних стекол вибраний склад $\text{SiO}_2\text{-FeO}$. Для оптимізації властивостей стекол були проаналізовані діаграми стану систем, в яких до базових компонентів додавалися в різних комбінаціях: CaO , MgO , Al_2O_3 . Потім визначали склад скла, що має мінімальну евтектичну температуру. Вибрані таким чином склади стекол були перераховані на масові відсотки. Рецепт стекол різних систем наведений в додатку (*Таблиця 1*).

Для варіння скла використовувалися наступні хімічні реактиви: аморфний кремнезем (SiO_2), Fe(II) оксид (FeO), кальцій карбонат (CaCO_3), магній оксид (MgO) та алюміній оксид (Al_2O_3). Варіння відбувалося в силітовій електропечі за температури 1300°C протягом 2 годин в нейтральних умовах. Для варки використовували шамотні тиглі ємністю 250 мл. Перед дослідженням скло проходило термообробку з метою його кристалізації. Скло повільно нагрівали інтервалі температур 550-800°C протягом 2 годин.

Варильну здатність скла, агресивність скломаси по відношенню до шамоту проводили візуально по методиці описаній у статті (*Племянніков і Жданюк, 2021*).

Термічні дослідження зразків склокристалічних матеріалів проводили на приладі Derivatograph Q-1500 (Угорщина) системи Paulik-Paulik-Erdey. Нагрівання зразків проводили до до 1000°C в атмосфері повітря. Швидкість нагрівання складала 10°C/хв. Маса зразків становила 1500 мг. В якості еталонної речовини взято Al_2O_3 . У досліджах використовували платиновий тигель. Чутливість приладу за шкалою ДТА – 250 мкВ.

Фазовий склад склоподібних матеріалів досліджували методом рентгенофазового аналізу (РФА) на дифрактометрі ДРОН 3М. Рентгенівська трубка: $\text{CuK}\alpha$. $U = 30\text{kV}$. Фази ідентифікували за допомогою картотеки ICDD.

У роботі також були досліджені магнітні властивості, а саме відносну добротність та магнітну проникність стекол за допомогою Q-метра Е 9-4. Відносну магнітну проникність матеріалу розраховували за рівнянням:

$$\Delta Q = \frac{Q_0 - Q}{Q_0} \cdot 100\%,$$

де:

Q_0 – добротність контуру з котушкою, заповненою повітрям ($\mu \approx 1$),

Q – добротність контуру з котушкою, заповненою речовиною ($\mu \neq 1$).

Відносну магнітну проникність матеріалу сердечника розраховували за формулою:

$$\mu = \frac{C_0 - C}{C_0} \cdot 100\%,$$

де:

C_0 – ємність контуру з котушкою, заповненою повітрям ($\mu \approx 1$),

C – ємність контуру з котушкою, заповненою речовиною ($\mu \neq 1$).

Результати та обговорення

Усі три склади під час варіння утворили непрозоре скло чорного кольору. Всі стекла були кондиційними. Треба відзначити, що найбільш легкоплавке скло утворилося для складу №1. Після перекристалізації колір склокристалічних матеріалів, теж був чорним.

Зразки склокристалічних матеріалів були досліджені за допомогою диференційного термічно аналізу (ДТА). Наявність екзотермічних ефектів на кривих ДТА усіх зразків свідчить про високу кристалізаційну здатність стекол і вірогідність утворення склокристалічних матеріалів. Причому для деяких складів присутні декілька піків, що свідчить про складний полімінеральний характер кристалізації (*Рисунок 2*).

Аналіз результатів РФА зразка № 1 підтвердив присутність кристалічної фази – магнетиту (Fe_3O_4). Отриманий магнетит характеризується феримагнітними властивостями. Також, на дифрактограмі помітне широке гало, що свідчить про наявність великої частки склофази (*Рисунок 3*).

Для складу № 2 крім незначних кількостей магнетиту, також можливе утворення магнезіофериту (MgFe_2O_4). Присутність у залізовмісному силікатному розплаві MgO цьому сприяє (*Wisniewski та ін., 2011*). Для зразка 3 можливе утворення тільки незначної кількості кристалів з магнітними властивостями. Дана система була вивчена нами у роботі (*Плем'яніков і Жданюк, 2021*). Підтверджено, що у даній системі утворюються кристалічні фази: $2(\text{Mg,Fe})\text{O}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{MgO}\cdot\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, для яких нехарактерні магнітні властивості. Також, можливе утворення незначних кількостей магнезіофериту, що обґрунтовано у роботі (*D'Uppolito та ін., 2015*). Для перевірки впливу катіонів Fe^{2+} та Fe^{3+} на коливальні спектри дослідили тверді розчини $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-MgFe}_2\text{O}_4$ за допомогою раманівської спектроскопії. Встановлено, що на режими комбінаційного розсіювання впливає заміщення Mg^{2+} на Fe^{2+} у тетраедричнокоординованих місцях системи $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-FeAl}_2\text{O}_4$, і заміщення Fe^{3+} на Al^{3+} в октаедричнокоординованих місцях $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-MgFe}_2\text{O}_4$, що підтверджує можливість утворення магнезіофериту.

Важливою частиною досліджень було вивчення магнітних властивостей зразків. В результаті експериментальних випробувань було знайдено відносну відносну магнітну проникність та зміну добротності контуру отриманих склокристалічних матеріалів (Рисунок 4).

Як свідчать результати досліджень, композиційні стекла мають феримагнітні властивості. Найбільш виражені магнітні властивості характерні для зразка №1, що пояснюється утворенням кристалічних фаз магнетиту ($\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Магнетит – є типовим представником магнітних матеріалів. Завдяки упорядкуванню спінових моментів катіонів феруму за рахунок обмінної взаємодії між електронами 3d-оболонки сусідніх катіонів він має феримагнітні властивості. Відповідно до структури, магнітні спінові моменти іонів Fe(III), що розташовані в окта- та тетраедричних позиціях, є взаємоскомпенсованими, а паралельне упорядкування магнітних спінових моментів іонів Fe(II), що розташовані в октаедричних позиціях, формує магнітний момент мінералу (Дудченко, 2011). У зразках 2 та 3 утворюються у незначних кількостях магнетит та магнезіоферит. Магнезіоферит, як і магнетит має сильно виражені властивості. Він є крайнім членом ізоморфного ряду: магнетит ($\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) – магнезіоферит ($\text{MgO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Заміщення Fe^{2+} катіоном магнію в октаедричній позиції перериває обмін електрона Fe^{2+} 3d із сусідніми катіонами Fe^{3+} і має меншу магнітну сприйнятливість у порівнянні з магнетитом. У даній роботі ми отримали залізовмісний склокристалічний матеріал, що має виражені магнітні властивості. Перспективними є склади з високим вмістом магнетиту. Дослідження властивостей залізовмісних стекел будуть продовжені, так як це є одним з інноваційних напрямків сучасної фізики магнітних явищ.

Дискусія

Дослідження склокристалічних матеріалів на основі залізовмісних стекел – є актуальним завданням. Так як вміст оксидів феруму у промислових силікатних стеклах є строго регламентованим (долі відсотка), то і більшість досліджень проводилися саме на таких матеріалах. Введення у силікатну систему підвищеної кількості оксидів феруму суттєво змінює його властивості та дозволяє отримати матеріали з унікальними властивостями, наприклад склокераміку, що містить магнітну фазу в біосумісній склоподібній матриці. Такі матеріали можуть бути використані як термозатрава для лікування раку магнітною індукційною гіпертермією. Магнітні властивості, як правило, пояснюються наявністю магнітної фази (магнетиту (Fe_3O_4) або гематиту (Fe_2O_3) у скляній масі. У таких склокристалічних матеріалах іон $\text{Fe}^{3+}(3d^5, 6S^{5/2})$ демонструє поглинання електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) при кімнатній температурі. Для сучасної медичної магнітної склокераміки використовують силікатні системи: $\text{CaO}\text{--}\text{SiO}_2$; $\text{CaO}\text{--}\text{SiO}_2\text{--}\text{P}_2\text{O}_5$; $\text{Na}_2\text{O}\text{--}\text{CaO}\text{--}\text{SiO}_2\text{--}\text{P}_2\text{O}_5$; $\text{MgO}\text{--}\text{CaO}\text{--}\text{SiO}_2\text{--}\text{P}_2\text{O}_5\text{--}\text{CaF}_2$. Перспективним є дослідження систем $\text{CaO}\text{--}\text{Na}_2\text{O}\text{--}\text{B}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}\text{--}\text{SiO}_2\text{--}\text{P}_2\text{O}_5\text{--}\text{Na}_2\text{O}$.

Магнітні властивості стекел дозволяють використовувати їх в електроніці. Унікальне поєднання магнітних і механічних властивостей деяких аморфних сплавів робить матеріали привабливими для магнітних головок. Еластомагнітні перетворювачі та датчики, виготовлені зі звичайних магнітних сплавів, використовувалися для вимірювання стиску або розтягу протягом кількох років, і розробка здавалася майже завершеною.

Використання металевих стекол у лініях затримки поверхневої акустичної хвилі становить особливий інтерес, оскільки вони дають відносно велику варіацію часу затримки з невеликою зміною поля зсуву.

Анізотропні мікроструктури, що супроводжують просторову зміну намагніченості, також можуть створювати ефективні магнітні анізотропії. У багатьох випадках намагніченість значно зменшується через обмінні флуктуації, і матеріали, як правило, мають низьку коерцитивну силу та відсутність магнітної анізотропії.

Проведені дослідження дозволили розширити знання про властивості залізовмісних стекол, що можуть бути використані у технології утилізації відходів збагачення залізних руд. Такі відходи мають високу сировинну цінність, так як містять SiO_2 , Na_2O , CaO , MgO , Al_2O_3 , а також містять до 15% оксидів заліза. Дослідження властивостей залізовмісних силікатних систем дозволяють провести направлений синтез стекол та утилізувати відходи по скляній технології. Наприклад, отримання облицювального матеріалу з високими декоративними властивостями (системи $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O--CaO}$, $\text{SiO}_2\text{--CaO--MgO}$, $\text{SiO}_2\text{--MgO--Al}_2\text{O}_3$) або отримання волокнистих матеріалів по скляній технології із гірських порід, що містять високий вміст оксидів феруму.

Актуальним і перспективним є розробка теплоізоляційних матеріалів на основі залізовмісних стекол шляхом вспінювання залізовмісного скла. Отримане піноскло має комірчасту структуру. Характеризується високими теплоізоляційними властивостями (0,05-0,07 Вт/(м·К)) і шумопоглинанням до 56 Дб. Застосування високозалізистих складів піноскла потребує оптимізації хімічних і фізичних процесів його виробництва.

Висновки

В роботі досліджені силікатні стекла, що містять підвищену кількість оксидів заліза та склокристалічні матеріали на їх основі. Результати ДТА підтвердили, що запропоновані склади стекол мають високу здатність до кристалізації. Аналіз результатів РФА підтвердив присутність у склокристалічних матеріалах кристалічної фази – магнетиту (Fe_3O_4), що обумовлює магнітні властивості стекол. Дослідження відносної магнітної проникності підтвердили, що синтезовані стекла мають феримагнітні властивості. Таким чином, підтверджено, що залізовмісні склокристалічні матеріали характеризуються високими магнітними властивостями і можуть бути використані у пристроях високих технологій.



Список джерел інформації:

- Дудченко, Н. О. Магнітні властивості наномагнетиту, синтезованого в температурному діапазоні 40-90°C // Мінералогічний журнал. – 2011. – № 33(2) – С. 38-41. [Dudchenko, N. O. (2011). Magnetically powerful nanomagnetite synthesized in the temperature range 40-90°C. *Mineralogical Journal*, 33(2), 38-41. (In Ukrainian)]
- Плем'янніков, М., Жданюк, Н. Вивчення можливості утилізації відходів металургійних виробництв для отримання склокристалічних матеріалів // Norwegian Journal of Development of the International Science. – 2020. – № 42(1). – С. 51-58. [Plemiannikov, M. M., & Zhdanyuk, N. V. (2021). Study of the possibility of recycling waste from

- metallurgical industries for producing glass-crystal materials. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 42(1), 51-58. (In Ukrainian)].
- Плем'янніков, М. М., Жданюк, Н. В. Феросилікатні склокристалічні матеріали на основі відходів рудозбагачення // Питання хімії та хімічної технології. – 2021. – № 2(135). – С. 31-37. [Plemiannikov, M. M., & Zhdanyuk, N. V. (2021). Ferosilicate microcrystalline materials based on the use of ore mining equipment. *Issues of Chemistry and Chemical Technology*, 2(135), 31-37. (In Ukrainian)]. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2021-135-2-95-103>
- Фальковська, Т. И. Поглощательная способность стекол, содержащих оксиды элементов переходной валентности в области температур 290-1400 К [Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук]. Киев, 1989. [Falkovskaya, T. I. (1989). The absorption capacity of glasses containing oxides of transition valence elements in the temperature range 290-1400 K. [Abstract of the dissertation, Candidate of Technical Sciences]. Kiev. (In Ukrainian)].
- Alderman, O. L. G., Lazareva, L., Wilding, M. C., Benmore, C. J., Heald, S. M., Johnson, C. E., & Weber, J. K. R. (2017). Local structural variation with oxygen fugacity in $\text{Fe}_2\text{SiO}_{4+x}$ fayalitic iron silicate melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 203, 15-36. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.12.038>
- Calas, G., & Petiau, J. (1983). Coordination of iron in oxide glasses through high-resolution K-edge spectra: information from the pre-edge. *Solid State Communications*, 48(7), 625-629.
- Chevrel, M. O., Giordano, D., Potuzak, M., Courtial, P., & Dingwell, D. B. (2013). Physical properties of $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ – $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ – FeO – Fe_2O_3 melts: Analogues for extra-terrestrial basalt. *Chemical Geology*, 346, 93-105. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.09.004>
- Decterov, S. A., Jung, I. H., & Pelton, A. D. (2002). Thermodynamic modeling of the FeO – Fe_2O_3 – MgO – SiO_2 system. *Journal of the American Ceramic Society*, 85(12), 2903-2910. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2002.tb00554.x>
- D'Ippolito, V., Andreozzi, G. B., Lottici, P. P., & Bersani, D. (2015). Raman study of MgAl_2O_4 – FeAl_2O_4 and MgAl_2O_4 – MgFe_2O_4 spinel solid solutions. *Periodico di Mineralogia*, 61-62.
- Ebisawa, Y., Sugimoto, Y., Hayashi, T., Kokubo, T., Ohura, K., & Yamamuro, T. (1991). Crystallization of $(\text{FeO}, \text{Fe}_2\text{O}_3)$ – CaO – SiO_2 glasses and magnetic properties of their crystallized products. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 99(1145), 7-13. <https://doi.org/10.2109/jcersj.99.7>
- Paladino, A. E. (1960). Phase Equilibria in the Ferrite Region of the System FeO – MgO – Fe_2O_3 . *Journal of the American Ceramic Society*, 43(4), 183-191.
- Peys, A., White, C. E., Olds, D., Rahier, H., Blanpain, B., & Pontikes, Y. (2018). Molecular structure of CaO – FeO_x – SiO_2 glassy slags and resultant inorganic polymer binders. *Journal of the American Ceramic Society*, 101(12), 5846-5857. <https://doi.org/10.1111/jace.15>
- Plemiannikov, M., & Zhdaniuk, N. (2023). Determination of the influence of temperature, concentration of ferric oxides and oxidative conditions of glass boiling on the displacement of the equilibrium of ferric oxides $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leftrightarrow \text{FeO}$. *Technology Audit and Production Reserves*, 3(1/71), 10-14. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.283267>
- Tasheva, T., Harizanova, R., Mihailova, I., Cherkezova-Zheleva, Z., Paneva, D., Nedkova, M., & Christian Rüssel, C. (2023). Structure and redox ratio of soda-lime-silica glasses with high

- iron oxide concentrations. *International Journal Application Glass Science*, 14, 445-454. <https://doi.org/10.1111/ijag.16626>
- Vercamer, V. (2016). Spectroscopic and Structural Properties of Iron in Silicate Glasses [Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI]. 251.
- Wisniewski, W., Harizanova, R., Völksch, G., & Rüssel, C. (2011). Crystallisation of iron containing glass-ceramics and the transformation of hematite to magnetite. *CrystEngComm*, 13(12), 4025-4031. <https://doi.org/10.1039/C0CE00629G>
- Zhang, L., Liu, Y., Gao, F., Tan, J., Yang, L., Deng, T., & Du, Y. (2024). Thermodynamic description of the FeO–Fe₂O₃–MgO system and its extrapolation to the X–MgO–FeO–Fe₂O₃ (X=CaO and SiO₂) systems. *Journal of the American Ceramic Society*, 107(6), 4358-4372. <https://doi.org/10.1111/jace.19740>
- Zhdaniuk, N. V., & Plemiannikov, M. M. (2024). Recycling of ore processing waste using glass technology. *Publishing House "Baltija Publishing"*. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-8>



Додаток

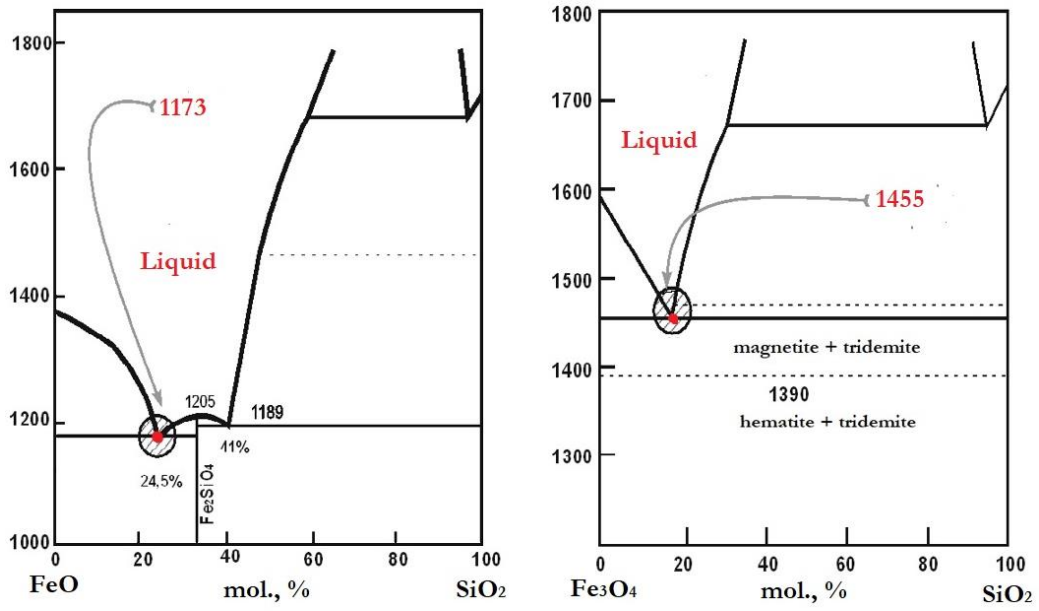


Рисунок 1. Бінарні системи: FeO-SiO₂ та Fe₂O₃-SiO₂

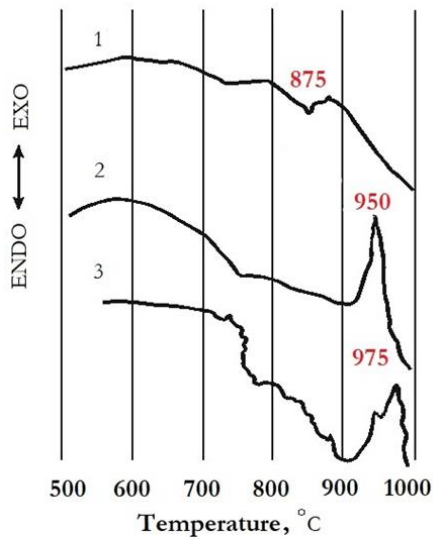


Рисунок 2. Результати ДТА зразків скла

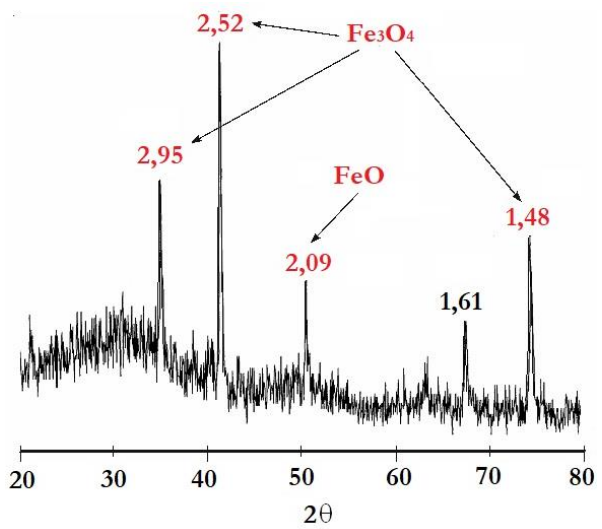


Рисунок 3. Дифрактограма композиційного скла № 1

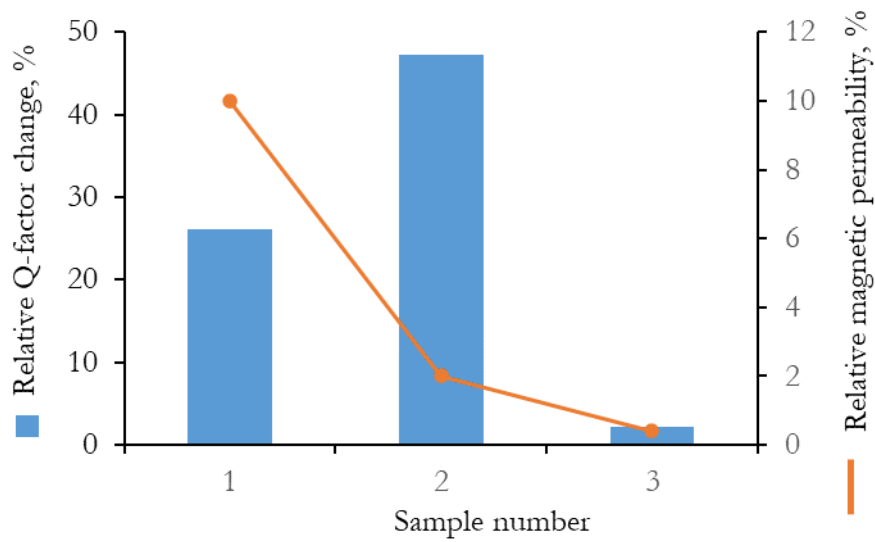


Рисунок 4. Відносна зміна добротності контуру та відносна магнітна проникність скла

Таблиця 1. Склади залізовмісних стекол

№ зразка	Система	T _{свт.} , °C	Склад скла, мас. %				
			FeO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃
1	SiO ₂ -FeO-CaO	1200	40	40	20	-	-
2	SiO ₂ -FeO-CaO-MgO	1150	40	37,5	13	9,5	
3	SiO ₂ -FeO-CaO-MgO-Al ₂ O ₃	1220	17	53	8	7,5	14,5