МІНЕРАЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ
MINERALOGICAL JOURNAL
(UKRAINE)

https://doi.org/10.15407/mineraljournal.47.01.045
УДК 548.549.621.14

В.М. Квасниця, д-р геол.-мін. наук, проф., зав. від.
E-mail: kvasnytsya@ukr.net; https://orcid.org/0000-0002-3692-7153
Г.Г. Павлов, канд. геол.-мін. наук, доцент, старш. наук. співроб.
E-mail: genychpavlov@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-5913-042X
О.А. Вишневський, канд. геол.-мін. наук, пров. наук. співроб.
E-mail: vyshnevskyy@i.ua; https://orcid.org/0000-0002-7206-2185
І.В. Гурненко, мол. наук. співроб.
E-mail: guriv@ukr.net; https://orcid.org/0000-0001-7600-6909
Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України
03142, м. Київ, Україна, просп. Акад. Палладіна, 34

КРИСТАЛИ ФАЯЛІТУ ІЗ ШЛАКУ СТАРОДАВНЬОЇ ПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ НА ВОЛИНІ

Вивчено кристали фаяліту із стародавнього шлаку, знайденого на Волині. Мінерал складає основну масу шлаку, менше поширені фази оксиду кремнію (металургійне скло), заліза (магнетит), неідентифікована силікатна фаза X та окремі детритові зерна кварцу. Кристали фаяліту мають переважно скелетну (футляроподібну) форму в матриці шлаку і тісне поєднання декількох різних морфологічних типів багатогранників у його порожнинах. Вони огранені пінакоїдом {010} і призмами {021}, {110} та {120}. Габітус кристалів, які часто видовжені вздовж [001], призматичний, пінакоїдальний і пінакоїдально-призматичний. Найчастіше скелетними є грані призми {021} і пінакоїда. Ядра — центральні частини кристалів фаяліту — збагачені включеннями скла, магнетиту і фази X. Виявлена зональність і нашарування кристалів фаяліту в площині (021). Поверхня кристалів фаяліту часто декорована мікрокристалами магнетиту. У матриці шлаку, зокрема в кристалах фаяліту, магнетит утворює кубічні кристали і дендрити, а скло — різні ксеноформи і дендрити. Хімічний склад кристалів фаяліту відносно однорідний, середній вміст FeO — 68,00 мас. % і SiO_2 — 32,00 мас. %. Джерелом для виплавляння заліза та отримання шлаку була болотна сидеритова чи гідрогетитова руда, збагачена калієм і фосфором. Температура утворення кристалів фаяліту з розплаву шлаку могла досягати понад 1000 °C.

Ключові слова: *стародавній шлак, фаяліт, скло, магнетит, болотна руда, Волинь.*

Вступ. Зразок невідомого складу і походження передав нам для дослідження геолог Ярослав Косовський з м. Ковель, зауваживши про його можливу метеоритну природу (рис. 1). Знахідку виявили у ґрунті на присадибній ділянці, ймовірно, біля с. Рудня Ковельського району, проте нині вже неможливо з'ясувати точне місце. Селу Рудня понад 400 років. Існують перекази, що в цій місцевості по берегах р. Вижівки вели розробки так званої болотної руди для виробництва заліза. Рудна справа й дала назву селу.

Зразок має чорне з бурим відтінком забарвлення, пористу поверхню із брунькопо-

Цитування: Квасниця В.М., Павлов Г.Г., Вишневський О.А., Гурненко І.В. Кристали фаяліту із шлаку стародавньої плавильної печі на Волині. *Мінерал. журн.* 2025. **47**, № 1. С. 45—54. https://doi.org/10.15407/mineraljournal.47.01.045

© Видавець ВД "Академперіодика" НАН України, 2025. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

дібними обрисами. Під кіркою вивітрювання помітно скляний та металевий блиск його поверхні. Первинний розмір зразка у формі грудки становив 6×6 см, маса 202,4 г. На рис. 1 показані його розрізані частини. Перші дослідження зразка дали змогу відкинути його неземну природу і віднести до шлаку, отриманого під час виплавляння заліза, зокрема, із болотних руд. Однак походження шлаку не є головною метою нашого нинішнього дослідження. Значно більший інтерес для подальших досліджень зразка було викликано незвичайними кристалами олівіну (фаяліту), якими він складений на понад 90 %. Кристали мають специфічну морфологію (переважно скелетну) і тісне поєднання декількох різних морфологічних типів у порожнинах шлаку. Остання особливість характерна для олівіну шлаків і не відзначена, наприклад, для нього в олівінітах, дунітах та інших ультраосновних породах. Водночас розвиток скелетних форм олівіну є відносно звичайним для ультраосновних і основних порід, особливо такі форми олівінів властиві базальтовим і верхнім шарам коматиїтових потоків, хоча є типовішими для різних металургійних шлаків. Не менш цікавим було б виявлення в такій "фаялітовій породі", принаймні за хімічним складом, кристалів сильно залізистого олівіну — лайхуніту, який вважають продуктом окиснення фаяліту (Laihunite Research Group, 1982).

Методи дослідження. Морфологію і хімічний склад фаз зразка вивчено із застосуванням сканівного електронного мікроскопа *JSM*-6700*F*, оснащеного енергодисперсійною системою для мікроаналізу *JED*-2300 (*JEOL*, Японія). Умови зйомки: прискорювальна напруга — 20 кВ, струм зонда — 1,0 наноампер, діаметр зонда — 1 мкм, час набору спектра характеристичного рентгенівського випромінювання у кожній точці — 60 с. Як стандарти використані чисті метали та синтетичні мінерали. Внесення поправок у результати вимірів і розрахунок концентрацій елементів здійснено методом *ZAF*-корекції з використанням оригінального програмного забезпечення фірми *JEOL*. Рентгенівські дані для порошку із зразка отримані за допомогою ДРОН-2 (CuKα = 1,54178 Å), інфрачервоний спектр — ІЧ-спектрометра *UR*-20. Петрографію двох шліфів зразка шлаку вивчено на поляризаційному мікроскопі, модель *CX*40*P*.

Результати досліджень зразка шлаку. ***Рентгенометричні дані зразка.*** Найінтенсивніші лінії на дифрактограмі свідчать про домінування у досліджуваному зразку фаяліту і, ймовірно, про відсутність лайхуніту (табл. 1). Тобто умовно цей зразок можна вважати цілковито фаялітовим шлаком. Імовірна наявність у зразку лайхуніту потребує виконання точніших структурних і трансмісійних електронно-мікроскопічних досліджень (наприклад, Laihunite Research Group, 1982; Martin et al., 2015).

Інфрачервона спектроскопія зразка. ІЧ спектри мінералів олівінової групи мають ряд загальних особливостей і характеризуються системою декількох інтенсивних ліній в області 800—1010 см$^{-1}$, обумовлених коливаннями тетраедрів SiO_4 у структурі олівіну. Симетрія кременекисневих тетраедрів залежить від розмірів катіонів, що складають кристалічну ґратку олівіну, причому під час переходу від фаяліту до форстериту зі збільшенням магнезіальності підвищується частота Si—O коливань. Залежно від Fe-Mg заміщень у структурі олівінів змінюється частотна характеристика смуг в інфрачервоних спектрах (Hofmeister and Pitman, 2007; Hamilton, 2010).

Аналіз положення смуг олівіну в ІЧ спектрах волинського зразка, фаялітів із двох типів металургійного шлаку мідного виробництва

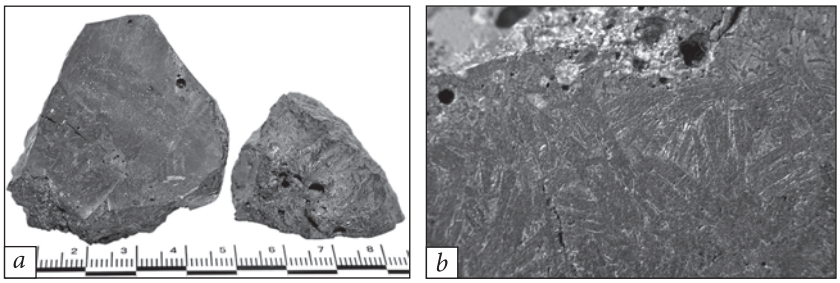

Рис. 1. Зразок дослідженого шлаку: *a* — дві розрізані частини; *b* — пришліфована поверхня більшої частини

Fig. 1. Sample of Volyn slag: *a* — its two cut parts; *b* — polished surface of a larger part of the slag

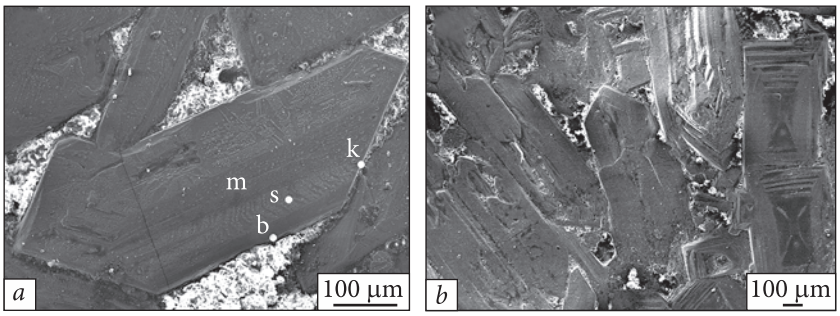

Рис. 2. Морфологія кристалів фаяліту із порожнини шлаку: *a* — добре розвинутий кристал (прості форми: призми *k*{021}, *m*{110}, *s*{120} і пінакоїд *b*{010}), поверхня якого покрита численними виділеннями рудного мінералу; *b* — різні морфологічні типи кристалів фаяліту на стінці порожнини. РЕМ знімки

Fig. 2 Morphology of fayalite crystals from the slag cavity: *a* — well-developed crystal (simple forms: prisms *k*{021}, *m*{110}, *s*{120} and pinacoid *b*{010}), its surface is covered with numerous overgrowths of the ore mineral; *b* — the neighborhood of different morphological types of fayalite crystals on the cavity wall. SEM images

Таблиця 1. **Дифракційні параметри дослідженого зразка**
Table 1. **Diffraction data of the Volyn slag**

Sample, Volyn		Fayalite (JCPDS*, 71, 1667)			Laihunite (JCPDS, 78, 1435)		
d (Å)	Int	d (Å)	Int	hkl	d (Å)	Int	hkl
3.532	6	3.549	651	111	3.473	999	111
2.804	8	2.823	933	130	2.779	408	130
2.534	10	2.559	658	131	2.519	735	131
2.466	10	2.495	999	112	2.410	315	112
2.289	3	2.296	133	140	2.255	140	140
1.823	4	1.828	62	151	1.781	126	151
1.764	8	1.774	667	222	1.747	246	222
1.521	5	1.527	36	251	1.510	19	251
1.507	5	1.511	217	062	1.459	85	062
1.334	4	1.338	100	134	1.294	24	134
1.155	4	1.158	19	263	1.136	3	263
1.116	4	1.116	25	135	—	—	—
1.094	7	1.094	57	422	—	—	—
1.060	6	—	—	—	—	—	—
1.042	5	—	—	—	—	—	—

Примітка. Прочерк — не визначено.
Note: Dash — not defined. * JCPDS — International Centre for Diffraction Data, 1998; Int — intensity.

Таблиця 2. **Положення смуг олівіну в ІЧ спектрах, см$^{-1}$ (Hofmeister and Pitman, 2007; Hamilton, 2010; Mihailova and Mehandjiev, 2010)**
Table 2. **Olivine band positions in the infrared spectra, cm^{-1} (Hofmeister and Pitman, 2007; Hamilton, 2010; Mihailova and Mehandjiev, 2010)**

Sample	Band, cm^{-1}							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Volyn slag, fayalite	950	920	880	835, 825	565	510	478	408
Slag 1, fayalite	948	914	874	826	562	502	472	425
Slag 2, fayalite	947	911	873	826	564	504	475	413
Fo#0	946	917	879	830	569	505	479	418
Fo#50	963	936	887	836	588	516	491	—
Fo#100	987	961	891	842	617	528	510	476

Примітка. Прочерк — не визначено.
Note. Dash — not defined.

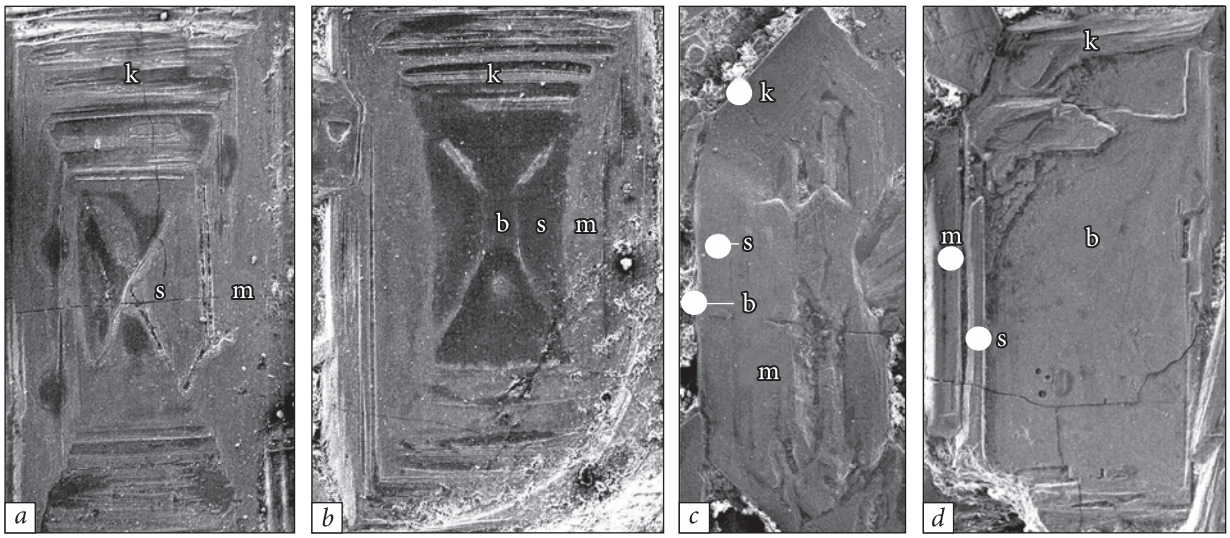

Рис. 3. Морфологічні типи кристалів фаяліту із порожнини шлаку із різним розвитком граней пінакоїда {010}: *a—c* — призматичні кристали; *d* — пінакоїдальний. Форми: *k*{021}, *m*{110}, *s*{120} і *b*{010}. РЕМ знімки

Fig. 3. Morphological types of fayalite crystals from the slag cavity with different development of pinacoid {010} faces: *a—c* — prismatic crystals and *d* — pinacoidal. Forms: *k*{021}, *m*{110}, *s*{120} and *b*{010}. SEM images

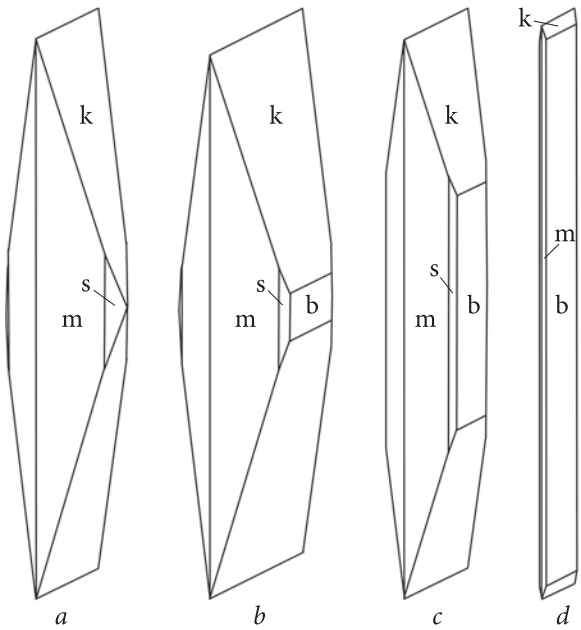

Рис. 4. Ідеалізовані зображення морфологічних типів кристалів фаяліту із порожнини шлаку. Показано перехід від призматичного до пінакоїдального габітусу кристалів. Форми: *k*{021}, *m*{110}, *s*{120} і *b*{010}

Fig. 4. Idealized images of morphological types of fayalite crystals from the slag cavity, showing the transition from prismatic to pinacoidal crystal habit. Forms: *k*{021}, *m*{110}, *s*{120} and *b*{010}

(1 — пічний; 2 — конвертерний шлак) (Mihailova and Mehandjiev, 2010) та природних олівінів *Fo*#0, *Fo*#50 і *Fo*#100 (Hofmeister and Pitman, 2007; Hamilton, 2010) підтверджує фаялітову кристалічну основу дослідженого зразка (табл. 2).

Морфологія кристалів фаяліту у порожнинах зразка. Багатогранники фаяліту розвинуті лише на стінках порожнин (рис. 2). Майже всі кристали є видовженими за [001]. Їхній розмір за видовженням досягає 1—2 мм. Кристали є неповногранними, тільки їхня верхня частина має добре огранення. Нижня частина кристалів прикріплена до стінок порожнин. За відомими даними гоніометричних замірів кристалів олівіну кут між сусідніми гранями призми *k*{021}, а саме кут між (021)—($0\bar{2}1$) гранями становить 80°54'. Приблизно такий самий кут у 81° фіксуємо між відповідними призматичними гранями кристала фаяліту на рис. 2, *a*, що дає змогу визначити символ призми як {021}. Відповідно інші грані на цьому кристалі представлені ймовірними призмами {110} і {120} та пінакоїдом {010}.

За розвитком і співвідношенням граней різних простих форм можна виділити чотири морфологічні типи кристалів у порожнинах (рис. 3, 4), з яких пінакоїдально-призматичний і пінакоїдальний, можливо, домінують у матриці шлаку. Різні типи кристалів трапляються по сусідству (рис. 2), тобто

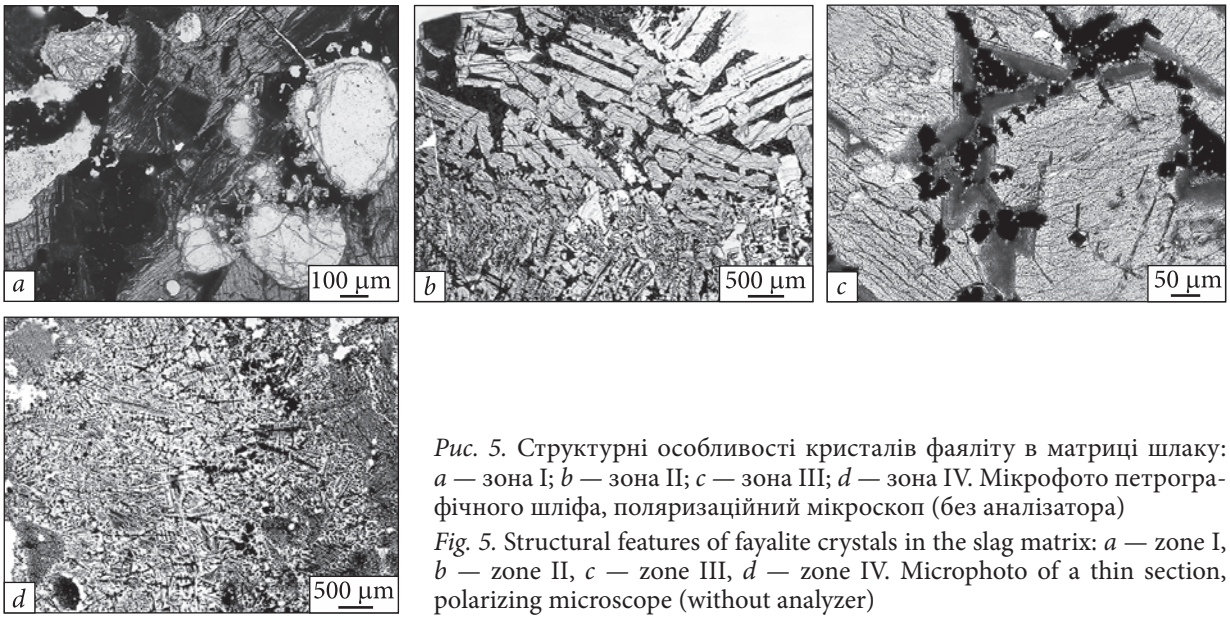

Рис. 5. Структурні особливості кристалів фаяліту в матриці шлаку: *a* — зона I; *b* — зона II; *c* — зона III; *d* — зона IV. Мікрофото петрографічного шліфа, поляризаційний мікроскоп (без аналізатора)

Fig. 5. Structural features of fayalite crystals in the slag matrix: *a* — zone I, *b* — zone II, *c* — zone III, *d* — zone IV. Microphoto of a thin section, polarizing microscope (without analyzer)

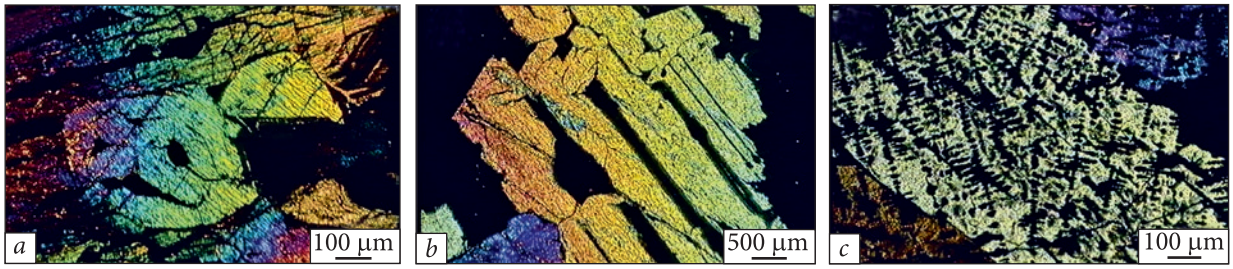

Рис. 6. Обриси зрізів кристалів фаяліту в матриці шлаку: *a* — пінакоїдальних чи призматичних; *b* — скелетних (футляроподібних); *c* — агрегатно-пінакоїдальних чи призматичних. Мікрофото петрографічного шліфа, поляризаційний мікроскоп (з введеним аналізатором)

Fig. 6. Outlines of fayalite crystal sections in the slag matrix: *a* — for pinacoidal or prismatic crystals; *b* — for skeletal (case-like) crystals; *c* — for aggregate-pinacoidal or prismatic crystals. Microphoto of a thin section, polarizing microscope (with inserted analyzer)

кристали фаяліту демонструють разючі відмінності за габітусом на невеликій площі стінки порожнини — мініатюрно локальній ділянці кристалізації.

Петрографія зразка. Будова зразка — неоднорідна, помітна його шаруватість, виражена в зміні розміру індивідів, співвідношенні силікатних та рудних кристалів (рис. 5). За розміром та структурою кристалів виділяють такі зони: I — великопориста з округлими зернами кварцу та ідіоморфними кристалами фаяліту (рис. 5, *a*); II — з довгопризматичним чи пінакоїдальним коробчастим (скелетним) фаялітом + рудним мінералом + гізингеритом (?) і селадонітом (?) (рис. 5, *b*); III — з алотріоморфнозернистим довгопризматичним чи пінакоїдальним фаялітом з грубою сіткою ланцюжків скла

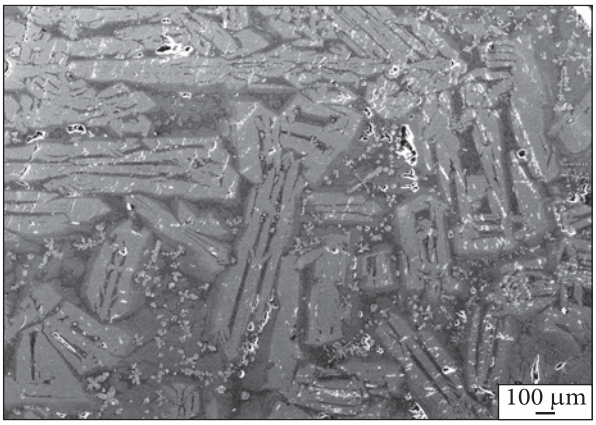

Рис. 7. РЕМ знімок кристалів фаяліту в матриці шлаку, у площині зрізу. Видно прояви дендритного росту кристалів фаяліту і магнетиту

Fig. 7. SEM image of fayalite crystals in the slag matrix, in the section plane. Manifestations of dendritic growth of fayalite and magnetite crystals are visible

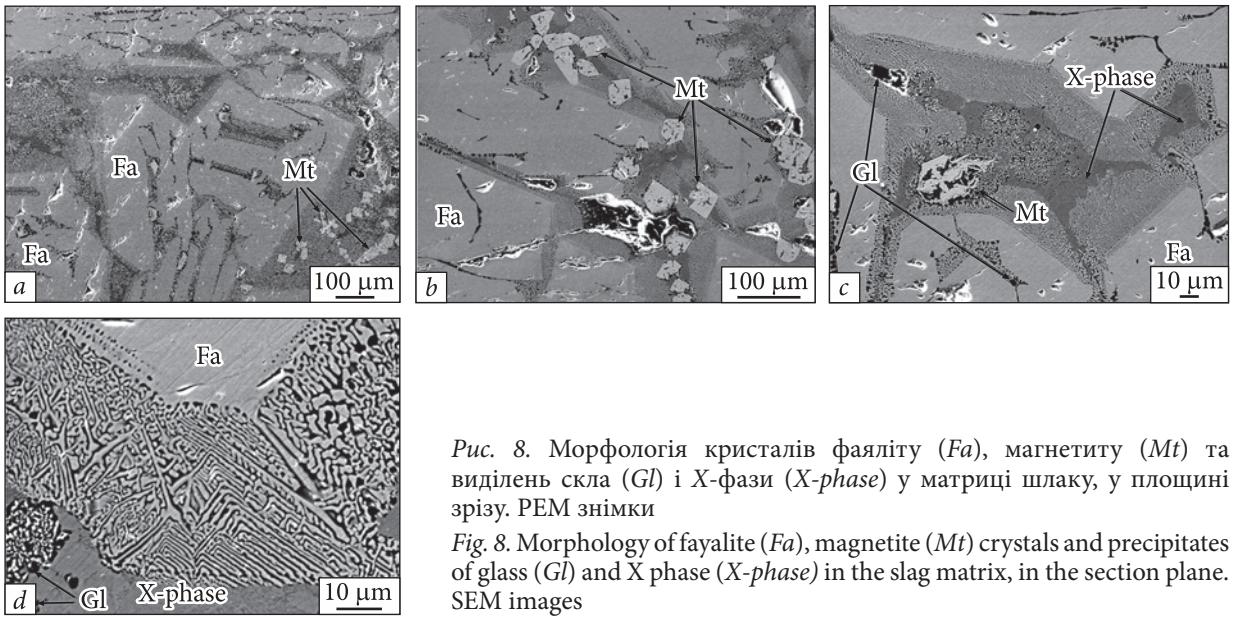

Рис. 8. Морфологія кристалів фаяліту (*Fa*), магнетиту (*Mt*) та виділень скла (*Gl*) і *X*-фази (*X-phase*) у матриці шлаку, у площині зрізу. РЕМ знімки

Fig. 8. Morphology of fayalite (*Fa*), magnetite (*Mt*) crystals and precipitates of glass (*Gl*) and X phase (*X-phase)* in the slag matrix, in the section plane. SEM images

(рис. 5, *c*); IV — тонкозерниста (вуалева) сітка проростання скла в фаяліті (рис. 5, *d*). Углиб зразка видно багаторазове повторення шарів III і IV типів.

Головною кристалічною фазою шлаку є фаяліт. Його забарвлення в шліфі світле, бурувато-зелене. Рельєф високий, що відповідає олівінам. Згасання пряме, Nm||c, 2V = = –47° (чистий фаяліт). У зоні I в інтерстиціях між кристалами фаяліту разом із кристалами рудного мінералу трапляються виділення, можливо, гізингериту і селадоніту (рис. 6). Обриси зрізів кристалів фаяліту відкривають їхню переважну призматичну чи пінакоїдальну і призматично-скелетну чи призматично-пінакоїдально-скелетну форму з видовженням за [001] (рис. 6).

Рідкісні зерна кварцу округлі, розтріскані по контуру (рис. 5, *a*). Згасання блокове, хвилясте, що вказує на їхню можливу тектонічну деформацію. Природа знаходження кварцу у зразку шлаку явно техногенна.

РЕМ дослідження зразка. Електронно-мікроскопічні дослідження шлаку підтверджують особливості петрографії та морфології кристалів фаяліту у порожнинах зразка. РЕМ знімки (рис. 7, 8) висвітлюють внутрішню будову зразка — його матриці. Більшість кристалів фаяліту видовжені, а їхні центральні частини містять скло, рудний мінерал і *X*-фазу. За даними мікрозондового аналізу рудний мінерал ми відносимо до магнетиту. Він утворює в шлаку розсіяну вкрапленість у вигляді окремих гіпідіоморфних та ідіоморфних кубічних кристалів розміром до 90—100 мкм, їхніх ланцюжків і дендритів (рис. 8). Вміст магнетиту у шлаку не перевищує 2—3 об. %, значна його частина зосереджена в міжзерновому просторі агрегатів фаяліту.

За поширенням скло є другою фазою у шлаку, вміст якої не перевищує приблизно 5 об. %. Трапляється часто разом з магнетитом і фазою *X* (рис. 8), виповнюючи інтерстиції між кристалами фаяліту та їхні центральні частини. Нерідко скло утворює своєрідні візерункові проростання кристалів фаяліту (рис. 8, *d*). Однак більшість виділень скла, магнетиту і *X*-фази займають проміжки серед кристалів фаяліту. Форма виділень скла різноманітна: краплини, дендрити, химерні візерунки. Виділення *X*-фази є ксеноморфними.

Мікрозондовий аналіз зразка. У табл. 3—6 наведено дані про хімічний склад чотирьох різних фаз у зразку. Приклади зображень проаналізованих фаз показано на рис. 9. Хімічний склад фаяліту майже однорідний (табл. 3, наведено лише декілька репрезентативних аналізів); іноді він збагачений на SiO_2 (до 34,82 мас. %) з домішками CaO — 0,33 і K_2O — 0,46 мас. %. Середній вміст силікату, розрахований із 30 аналізів, складає: FeO — 68,00 і SiO_2 — 32,00 мас. %, тобто його хімічн-

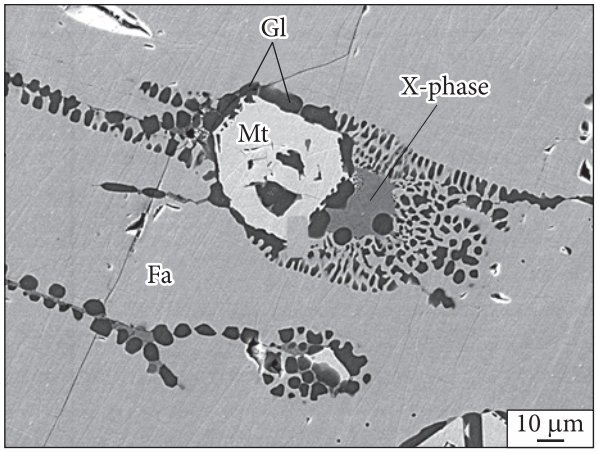

Рис. 9. РЕМ знімок включень у центральних частинах кристалів фаяліту (*Fa*, світло-сірий): білі, місцями ідіоморфні, кристали — магнетит (*Mt*); численні чорні округлі виділення — скло (*Gl*); темно-сірі ксеноморфні виділення — фаза *X*

Fig. 9. SEM image of inclusions in the central parts of fayalite crystals (*Fa*, light gray): white, sometimes idiomorphic, crystals — magnetite (*Mt*); numerous black rounded inclusions — glass (*Gl*) and dark-gray xenomorphic inclusions — phase X (*X-phase)*

Таблиця 3. **Результати мікрозондового аналізу фаяліту, мас. %**

Table 3. **Microprobe analyses of fayalite, wt. %**

Analysis number	FeO	SiO_2	Σ
1	68.43	31.57	100
2	68.26	31.74	100
3	68.08	31.92	100
4	67.23	32.77	100
5	67.68	32.32	100

ний склад близький до стехіометрії для фаяліту: FeO — 70,52 і SiO_2 — 29,48 мас. %. Також відносно однорідним є хімічний склад магнетиту (табл. 4). Мінливий хімічний склад має скло (табл. 5) і неідентифікована силікатна фаза *X* (табл. 6), яка збагачена фосфором і калієм.

Обговорення результатів дослідження. *Походження шлаку.* Результати дослідження складу волинського шлаку дають підстави стверджувати, що він отриманий під час виплавляння заліза із болотної руди (сидеритової чи гідрогетитової як продукту окиснення першої) в давній плавильній печі. Такі руди, а також манганова (родохрозитова), поширені на Волині і служили прекурсором

Таблиця 4. **Результати мікрозондового аналізу фази FeO (магнетиту), мас. %**

Table 4. **Microprobe analyses of the FeO-phase — magnetite, wt. %**

Analysis number	FeO	SiO_2	K_2O	Σ
1	98.22	1.78	—	100
2	91.41	7.91	0.68	100
3	98.00	2.00	—	100
4	98.30	1.70	—	100
5	97.42	2.58	—	100

Примітка. Прочерк — не визначено.

Note. Dash — not defined.

Таблиця 5. **Результати мікрозондового аналізу скла (1—4) та фази SiO_2 (5), мас. %**

Table 5. **Microprobe analyses of glass (1—4) and SiO_2-phase (5), wt. %**

Analysis number	SiO_2	Al_2O_3	FeO	CaO	Na_2O	K_2O	Σ
1	78.87	4.44	9.54	1.59	0.83	4.73	100
2	56.76	2.90	36.30	1.67	—	2.36	100
3	80.93	4.48	8.24	1.37	0.64	4.34	100
4	80.51	4.66	8.17	1.40	0.63	4.62	100
5	100.00	—	—	—	—	—	100

Примітка. Прочерк — не визначено.

Note.: Dash — not defined.

Таблиця 6. **Результати мікрозондового аналізу недіагностованої фази *X*, мас. %**

Table 6. **Microprobe analyses of undiagnosed X-phase, wt. %**

Analysis number	SiO_2	Al_2O_3	FeO	CaO	K_2O	P_2O_5	Σ
1	42.41	1.12	26.33	21.82	0.56	7.76	100
2	47.36	0.46	31.49	18.35	0.12	2.22	100
3	41.90	0.89	25.24	22.90	0.62	8.44	100
4	43.60	1.03	25.22	22.86	—	7.28	100
5	46.17	2.24	26.45	18.99	1.02	5.14	100

Примітка. Прочерк — не визначено.

Note. Dash — not defined.

для виробництва металу ще у XVII—XVIII ст. Болотна руда залягає у вигляді конкрецій (бобові руди), прошарків, кірочок, а серед торфу — найчастіше у вигляді лінз (Rykhlitskyi, 2022). Болотні руди містять 20—60 % оксидів заліза, а також деякі кількості окси-

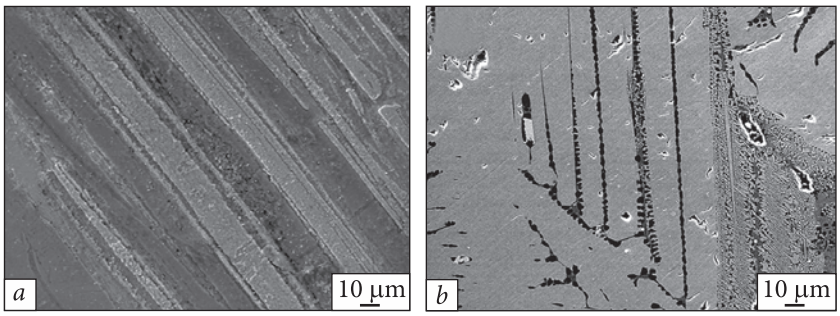

Рис. 10. РЕМ знімки зовнішнього і внутрішнього проявів зонального росту в кристалах фаяліту: *a* — зовнішні зони росту на поверхні грані призми {021}; *b* — декоровані чорними виділеннями скла внутрішні зони росту кристала фаяліту вздовж (021)

Fig. 10. SEM images of external and internal manifestations of zonal growth in fayalite crystals: *a* — external growth zones on the surface of the prism face {021}; *b* — internal growth zones of the fayalite crystal along (021) decorated with black glass inclusions

ду мангану, води (до 30 %), кременекислоти у вигляді силікатів, домішку піску, органічних речовин, фосфорної кислоти (до 8 %). У стародавніх печах для відновлення заліза досягалась температура від 400 до 800—900 °С і вища для відділення шлаків.

Кристалогенезис фаяліту. Спостереження за основною масою шлаку (рис. 5—8) свідчать, що мікроскопічна картина матриці характеризується, насамперед, наявністю пакетів великих таблитчастих кристалів фаяліту з чітко вираженим футляроподібним характером і проявами дендритного росту по (021) разом із вкрапленнями його дрібніших кристалів та виділень скла, магнетиту і недіагностованої фази *X*. Останні три фази займають як центральні частини кристалів фаяліту, так й інтерстиційні проміжки між ними. Виникнення футляроподібних кристалів зумовлено саме захопленням частково диференційованого розплаву шлаку, збагаченого SiO_2, і дещо пізніше окристалізованого в межах кожного індивіду фаяліту. Скелетний ріст також проявлений на гранях призми {021} і пінакоїда. Кристали фаяліту формувались переважно пірамідами росту <021>, що видно із картин зональності індивідів по (021) (рис. 10). Видовження кристалів уздовж [001] зумовлене панівним ростом пірамід <021>.

На кристалах фаяліту із порожнин шлаку розвинуті грані структурно важливих форм: пінакоїда {010} і призм {021}, {110} та {120}. Вказані форми є типовими для кристалів олівіну, зокрема для фаяліту (Goldschmidt, 1920). Частоту розвитку граней пінакоїда та утворення тонких пінакоїдальних пластин фаяліту (рис. 3, 4), обмежених переважно гранями 010), можна пояснити тим, що в площині (010) є три напрямки — [001], [101] і [100], які відповідають векторам міцного зв'язку — періодичним ланцюжкам зв'язку *PBCs* (Hartman, 1953).

Температурний режим кристалізації розплаву дослідженого шлаку можна відносно оцінити між температурою зародження кристалів фаяліту та наростами численних мікрокристалів магнетиту на поверхні граней багатогранників фаяліту у порожнинах: від зародків фаяліту за ~1000 °С і до росту мікрокристалів магнетиту за 50—130 °С.

Кристали фаяліту, які майже повністю аналогічні за морфологією (ті самі прості форми і габітуси, скелетні грані і футляроподібні індивіди) вивченим нами багатогранникам, були отримані експериментально під час кристалізації шлаків різного складу: силікатних шлаків мідного виробництва із змінним вмістом SiO_2 (Kirov and Ivanov, 1968) і з розплаву олівінового габронориту за температури 1250—1050 °С (Chelishchev, 1970). В обох випадках у процесі зниження температури, підвищення в'язкості розплавів (збільшення вмісту SiO_2) та зміни швидкості кристалізації завдяки переохолодженню відбувалась еволюція огранення кристалів олівіну різного складу з переважанням фаялітової складової: від ізометричних до скелетних, футляро- і лейстоподібних кристалів. Така сама морфологія кристалів олівіну різного складу (переважно форстеритового) описана із базальтової тефри конусів голоценового вулкана в Андах (Чилі) (Salas et al., 2021), базальтів вулкана виверження 2018 р. на Алясці (Huggins, 2023) та базальту вулкана, що діє на південному сході о. Реюньйон (фр.

Réunion) в Індійському океані (Маскаренські о-ви) (Welsch et al., 2013). Примітно, що огранення кристалів природного олівіну із базальтів Анд, Аляски і Маскаренських о-вів абсолютно таке саме, як і кристалів волинського фаяліту із шлаку. Ідентичне огранення кристалів олівіну отримано у ході його синтезу (Welsch et al., 2014).

Висновки. Показано, що під час кристалізації пічного шлаку, отриманого під час виробництва заліза в стародавній плавильній печі із болотної руди сидеритового чи гідрогетитового складу, в умовах вільної кристалізації у порожнинах утворились кристали фаяліту, які огранені структурно важливими простими формами: пінакоїдом {010} і призмами {021}, {110} та {120}. Кристали фаяліту формувались пірамідами росту <021>. Завдяки в'язкості розплаву шлаку і значній швидкості його охолодження виникли видовжені вздовж [001] футляроподібні кристали фаяліту. Характерно розмаїття морфологічних типів багатогранників фаяліту в порожнинах шлаку: від призматичних до пінакоїдальних, що є свідченням нерівноважних умов на останній стадії кристалізації фаяліту. В матриці шлаку прогнозуємо переважання призматично-пінакоїдальних і пінакоїдальних кристалів.

Виявлені особливості кристалогенезису штучного фаяліту можуть бути корисними під час вивчення кристалів природного олівіну різного походження. Вони можуть слугувати індикаторами мінералоутворювального середовища з високим вмістом кремнію та швидкої кристалізації різних олівінів.

Автори вдячні В.Т. Скобіну і О.П. Вовку за допомогу у підготовці рисунків.

REFERENCES / ЛІТЕРАТУРА

Chelishchev, N.F. (1970), *On the evolution of olivine form during crystallization of olivine gabbro-norite melt under experimental conditions.* In: *Ontogenic methods of mineral research,* Nauka, Moscow, pp. 124-129 [in Russian].

[Челищев, Н.Ф. (1970), Сб.: *Онтогенические методы исследования минералов.* Москва: Наука. С. 124—129.]

Goldschmidt, V. (1920), *Atlas der Krystallformen,* band VI, Heidelberg, Carl Winters Universitätsbuchhandlung, tafeln 50-62.

Hamilton, V.E. (2010), *Geochemistry,* Vol. 70, No. 1, pp. 7-33. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2009.12.005

Hartman, P. (1953), *Relations between structures and morphology of crystals*, Thesis, Univ. Groningen, Excelsior, 414 p.

Hofmeister, A.M. and Pitman, K.M. (2007), *Phys. Chem. Minerals*, Vol. 34, pp. 319-333. https://doi.org/10.1007/s00269-007-0150-1

Huggins, E.G. (2023), *Applications and examination of techniques used to determine magma storage and ascent timescales in arc volcanoes*, Doctor of Philosophy thesis, Univ. Nevada, Reno, 160 p. https://avo.alaska.edu › pdfs › cit15941

Kirov, G.N. and Ivanov, I. (1968), *Kristall und Technik*, Vol 3, Iss. 4, pp. 637-642. https://doi.org/10.1002/crat.19680030419

Laihunite Research Group, Institute of Geochemistry (1982), *Geochemistry*, Vol. 1, pp. 105-114. https://doi.org/10.1007/BF03180340

Martin, A.M., Medard, M., Devovard, B., Keller, L.P., Righter, K., Devidal., J.L. and Rahman, Z. (2015), *Amer. Mineral.*, Vol. 100, pp. 1153-1164. https://doi.org/10.2138/am-2014-5042

Mihailova, I. and Mehandjiev, D. (2010), *J. Univ. Chem. Technol. and Metallurgy*, Vol. 45, No. 3, pp. 317-326.

Rykhlitskyi, O. (2022), Polissya - the land of ancient metallurgists, LLC "Gazeta "Slovo" for 10.03.2022, Vyshgorod, UA [in Ukrainian]. URL: http://gazetaslovo.com.ua/polissya-kraj-starodavnih-metalurgiv/ (Accessed: 29.01.2025)

[Рихліцький, О. (2022), *Полісся – край стародавніх металургів.* Вишгород: ТОВ "Газета "Слово" за 10.03.2022.]

Salas, P., Ruprecht, P., Hernández, L. and Rabbia, O. (2021), *Nat Commun*, Vol. 12, 4069. https://doi.org/10.1038/s41467-021-24275-6

Welsch, B., Faure, F., Famin, V., Baronnet, A. and Bachèlery, P. (2013), *J. Petrology*, Vol. 54(3), pp. 539-574. https://doi.org/10.1093/petrology/egs077

Welsch, B., Hammer, J. and Hellebrand, E. (2014), *Geology*, Vol. 42(10), pp. 867-870. https://doi.org/10.1130/G35691.1

Received 08.12.2024

V.M. Kvasnytsya, DrSc (Mineralogy and Crystallography), Prof., Head of Department
E-mail: kvasnytsya@ukr.net; https://orcid.org/0000-0002-3692-7153
H.H. Pavlov, PhD (Mineralogy and Crystallography), Associate Professor, Senior Research
E-mail: genychpavlov@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-5913-042X
O.A. Vyshnevskyi, PhD (Geology and Mineralogy), Leading Researcher
E-mail: vyshnevskyy@i.ua; https://orcid.org/0000-0002-7206-2185
I.V. Gurnenko, Researcher
E-mail: guriv@ukr.net; https://orcid.org/0000-0001-7600-6909
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine
34, Acad. Palladin Ave., Kyiv, Ukraine, 03142

FAYALITE CRYSTALS FROM THE SLAG
OF AN ANCIENT SMELTING FURNACE IN VOLYN REGION

Fayalite crystals from ancient slag found in Volyn region were studied. Fayalite constitutes the bulk of the slag, less common phases of silicon oxide (metallurgical glass), iron (magnetite), unidentified silicate phase X and individual detrital quartz grains. Fayalite crystals have a predominantly skeletal (case-like) shape in the slag matrix and a close combination of several different morphological types of polyhedrons in its cavities. They are faceted by pinacoid {010} and prisms {021}, {110} and {120}. The habit of the crystals is prismatic, pinacoidal and pinacoidal-prismatic, they are often elongated along [001]. Most often skeletal are the faces of the prism {021} and pinacoid. The cores — the central parts of fayalite crystals are enriched with inclusions of glass, magnetite and phase X. Zoning and layering of fayalite crystals in the (021) plane were revealed. The surface of fayalite crystals is often decorated with magnetite microcrystals. In the slag matrix, particularly in fayalite crystals magnetite forms cubic crystals and dendrites, and glass forms various xenoforms and also dendrites. The chemical composition of fayalite crystals is relatively homogeneous, the average content of FeO is 68.00 wt. % and SiO_2 is 32.00 wt. %. The source for iron smelting and slag production was swamp siderite or hydrogoethite ore, enriched in potassium and phosphorus. The temperature of fayalite crystal formation from slag melt could reach more than 1000 °C.

Keywords: ancient slag, fayalite, glass, magnetite, bog ore, Volyn region.