

СТРУКТУРНО-МІНЕРАЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ НІКЕЛИСТОГО ЗАЛІЗА МЕТЕОРИТА ГАЛКІВ

Наведено результати оптично-мікроскопічного та сканувального електронно-мікроскопічного вивчення скульптури поверхні окремих зерен нікелістого заліза та аншліфа метеорита Галків. Уперше в метеориті діагностовано ільменіт та іоцит, а на поверхні зерен металу — численні включення та скульптури ударної деформації, нагріву та вивітрювання.

Вступ. Більшість звичайних хондритів містять ознаки ударного метаморфізму, що виникли при співударянні материнських тіл метеоритів під час їхнього існування в поясі астероїдів. До таких ознак належать деформаційні структури (крихкої — тріщини, дроблення кристалів, зміщення; пластичної — викривлення кристалічної ґратки мінералів, двійникування, згини кристалів) та структури нагрівання (перекристалізація, структури хімічної неоднорідності металу, плавлення мінералів) [1]. Вивчення структур ударного метаморфізму безпосередньо пов'язане з вивченням характеру і ступеня зміни їх первісних структурно-мінералогічних характеристик, а також з визначенням умов існування материнських тіл метеоритів у космосі. Експериментальні дослідження деформаційних структур в олівіні та плагіоклазі [2] дали змогу виділити шість стадій ударно-метаморфічного перетворення речовини метеорита і встановити величину ударного тиску, яка зумовила ці перетворення.

Одним із малодосліджених метеоритів, що зберігається в метеоритній колекції Національного науково-природничого музею НАН України [3], є нерівноважний хондрит Галків. Цей метеорит упав 12 січня 1995 р. поблизу с. Галків Чернігівської обл. і є останньою знахідкою, яка поповнила метеоритну колекцію музею. Згідно з попередніми структурно-мінералогічними дослідженнями, метеорит було класифіковано як звичайний хондрит хімічної групи Н та петрологічного типу 4 з прикметами ударно-метаморфічної стадії S3 (з ударним тиском $(100-200)10^2$ МПа) та ступенем вивітрювання W0 [4]. Проте, згідно з останніми дослідженнями С.Н. Ширінбекової [5], за 13-річний період знаходження метеорита у земних умовах ступінь його вивітрювання підвищився з W0 до W 2—3.

В.П. Семененко і А.Л. Гіріч показали [4], що хондрит Галків, особливо його зерна нікелістого заліза, є перспек-

тивними для вивчення структур ударного метаморфізму та умов еволюції материнського тіла в космосі. Згідно з цими дослідженнями, зерна металу переважно представлені камаситом, рідше — тенітом. Більші за розміром зерна характеризуються неправильною формою і розміщуються в матриці метеорита, деякі з них мають хвилясті краї, подібні до корозійних, і містять численні вклучення силікатів, фосфатів, хроміту. З урахуванням необхідності додаткових досліджень було проведено детальне вивчення скульптури поверхні, будови і хімічного складу зерен нікелістого заліза хондрита Галків.

Методи дослідження. Під бінокулярном марки МБС-10 з дрібною фракцією метеорита Галків було відібрано 50 зерен нікелістого заліза та 10 силікатно-металевих агрегатів для електронно-мікроскопічного дослідження скульптури їх поверхні. Серед відібраних зерен, які відрізняються за формою і розміром, переважають зерна неправильної (гілчастої) форми з неоднорідною матовою поверхнею. Такі зерна важко відчистити від силікатів, що зумовило значні обмеження у вивченні скульптури їх поверхні під сканувальним електронним мікроскопом (СЕМ).

Структурно-мінералогічні дослідження металу в аншлифах загальною площею 3,2 см² проведено під оптичним мікроскопом марки ПОЛАМ-Р321. За допомогою СЕМ марки JEOL JSM 6490LV вивчено особливості структури, мінерального та хімічного складу зерен металу в аншлифі площею 0,86 см². Вивчення морфологічних особливостей продуктів вивітрювання на сколах метеорита і окремих зразках нікелістого заліза здійснено із використанням СЕМ JSM 6060LA (Інститут ботаніки НАН України) і JSM 6490LV фірми JEOL. У процесі дослідження на СЕМ використовували напругу 15 кВ для індивідуальних зерен металу та 20 кВ — для нікелістого заліза в аншлифах. Хімічний склад мінералів у аншлифі, а також продуктів вивітрювання досліджено за допомогою енергодисперсійного спектрометра марки Penta FETx3 Oxford Instruments, яким обладнано СЕМ.

Результати досліджень. За формою та розмірами зерна нікелістого заліза можна поділити на три групи. Перша — зерна неправильної амебоподібної форми, краї їх гострі, на матовій поверхні спостерігається пластинчаста скульптура, розмір від 250 до 450 мкм. Друга — ізометричні зерна з блискучою полігонально-увігнутою поверхнею, розмір від 100 до 250 мкм. Третя група представлена округлими часточками з блискучою гладенькою поверхнею, розміром до 100 мкм. Окремо виділено плоскі зерна чорного кольору з матовою поверхнею. Форму цих зерен однозначно класифікувати неможливо, оскільки вони дуже крихкі, а деякі навіть розламалися під час підготовки для дослідження.

Під час електронно-мікроскопічних досліджень на поверхні амебоподібних зерен нікелістого заліза з рваними краями виявлено численні скульптурні елементи, які раніше спостерігали у металі інших хондритів [1]. Вони представлені правильними кристалами (силікатами ?), сходинками росту, вклученнями кубічних кристалів (хроміту ?) (рис. 1, а) та світлими кульками (розміром до кількох мікрометрів) з гладенькою поверхнею. Подібні світлі кульки знайдено в метеоритах Саратов, Оленівка та Олександрівський Хутір [6].

На поверхні багатьох зерен металу наявні скульптури деформації, нагріву та вивітрювання. Найцікавішими для дослідження скульптурами деформації є зерна з пластинчастою поверхнею. На поверхні зерен металу вони розміщуються як система паралельних пластинок, які виникли внаслідок зсувної деформації кристалічної ґратки металу під час ударного метаморфізму (рис. 1, б). Переважно виявлена одна система пластинок, проте на поверхні деяких зерен

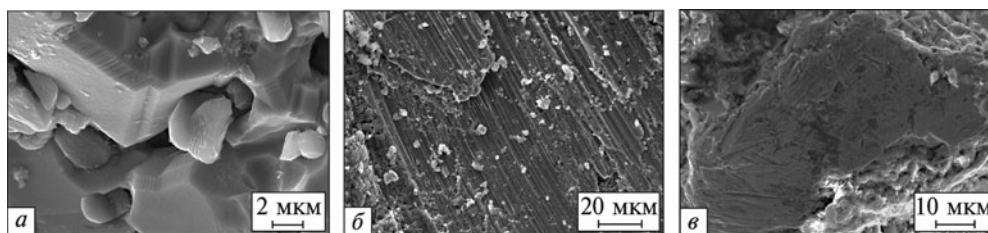


Рис. 1. СЕМ-зображення поверхні зерен нікелістого заліза:
а — включення на поверхні зерен; б — пластинчасті структури деформацій; в — вторинні пори

їх декілька. В окремих зразках деформаційні пластини характеризуються додатковою пластичною деформацією, а саме згином. Ознаки зсувної деформації виявлено на більшості відібраних для дослідження зерна. Здебільшого ці елементи розміщуються на окремих ділянках поверхні зерен і лише на кількох зразках уся поверхня зерна вкрита пластинками. Іноді на такій поверхні спостерігаються скульптури розщеплення пластинок металу, що вказує на його додаткову деформацію. На зернах із гладкою блискучою поверхнею деформаційні скульптурні елементи практично відсутні. Крім деформаційних елементів на поверхні зерен є скульптури нагріву — вторинні пори (рис. 1, в). Вони утворюють скупчення, краї їх корозійні, розміри пор досить великі і змінюються від 0,7 до 12 мкм.

Поверхня плоских чорних зерен під електронним мікроскопом вкрита голочками та пластинками, які, ймовірно, утворилися внаслідок вивітрювання.

Подальші електронно-мікроскопічні дослідження нікелістого заліза в аншлифі та визначення його складу дали нам змогу детальніше класифікувати ці зерна металу за формою, хімічним складом і впливом ударного метаморфізму на метеорит Галків.

Нікелісте залізо в хондриті переважно представлене зернами камаситу, меншою мірою тенітом і плеситом. Камасит характеризується різноманітністю форм — від великих амебоподібних зерен (100—300 мкм) до менших ізометричних та округлих зерен мікронних розмірів. У переважній більшості зерен металу та троїліту спостерігаються включення інших мінералів (рис. 2, б, в). У великих зернах камаситу включення мають значні розміри (до 10 мкм) і представлені здебільшого піроксенами, а також фосфатами — округлими, значно меншими за розмірами зернами. Деякі зерна нікелістого заліза містять включення троїліту або хроміту (рис. 2, г).

Теніт поширений у матриці метеорита, а також у хондрах, досить часто трапляються його зростки з троїлітом і хромітом, дуже рідко — з ільменітом (рис. 2, а). Зерна теніту насамперед округлої форми, краї їх менш рвані, розмір зерен значно менший, ніж камаситу.

Структури ударного метаморфізму в аншлифі метеорита Галків спостерігаються як структури плавлення (пилоподібні, жилкуваті, комірчасто-сітчасті) та структури пластичних деформацій і нагріву (структура заміщення з привнесенням сірки). Пилоподібні структури плавлення представлені дрібними зернами нікелістого заліза та троїліту, які заповнили дрібні пори в матриці метеорита. Внаслідок високої температури при ударі троїліт, розтікаючись по тріщинах у матриці, утворює жилкуваті структури плавлення. Нікелісте залізо і троїліт утворюють комірчасто-сітчасті структури плавлення. Ці структури подібні до паласитових, в яких нікелісте залізо складає каркас, а силікати заповнюють комірки. В деяких зернах нікелістого заліза виявлено

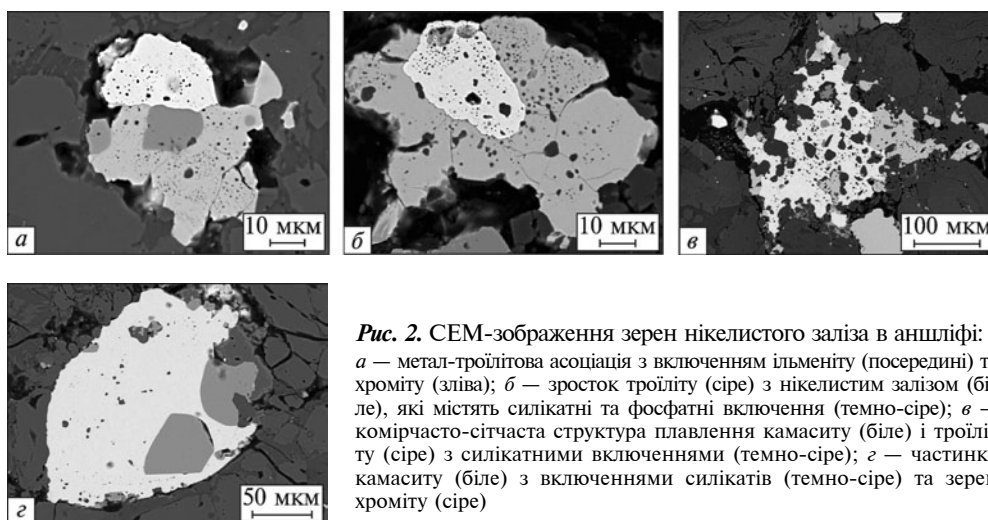


Рис. 2. СЕМ-зображення зерен нікелістого заліза в аншліфі:
a — метал-троїлітова асоціація з включенням ільменіту (посередині) та хроміту (зліва); *b* — зросток троїліту (сіре) з нікелістим залізом (біле), які містять силікатні та фосфатні включення (темно-сіре); *в* — комірчасто-сітчаста структура плавлення камаситу (біле) і троїліту (сіре) з силікатними включеннями (темно-сіре); *г* — частинка камаситу (біле) з включеннями силікатів (темно-сіре) та зерен хроміту (сіре)

процеси сульфідизації, тобто заміщення нікелістого заліза троїлітом. Саме в таких асоціаціях троїліту вміст Ni становить 0,34—1,43 %.

За допомогою енергодисперсійного спектрометра вивчено хімічний склад зерен нікелістого заліза (див. таблицю). Камасит метеорита Галків характеризується варіацією вмісту Ni від зерна до зерна (5,91—7,11 %) та рівномірним складом у межах зерен. Камасит містить незначну кількість Co — 0,61—1,26 %. Вміст Ni в теніті коливається в межах 34,3—50,3 %, Co — 0—0,83. Троїліт також характеризується однорідним хімічним складом зерен, наявністю невеликої кількості домішок Co ($\leq 1,0$ %) і дефіцитом заліза, що відповідає 57,2—58,9 % (теоретичний вміст заліза в троїліті 65 % [7]). У жилкуватих і сітчастих ударно-метаморфізованих структурах троїліту є домішки Si, Na, Cr, Ni, Cu, Mg, що може бути пов'язане із забрудненням з довколишніх мінералів. За даними хімічного аналізу комірчасто-сітчастих структур, їхній каркас складений не нікелістим залізом, а іоцитом (98,6 % FeO та 1,39 % NiO), який утворився внаслідок ударного метаморфізму.

Електронно-мікроскопічне дослідження показало, що на поверхні уламків хондрита Галків, особливо на поверхні зерен нікелістого заліза, наявні різноманітні за морфологією і характером розподілу продукти вивірювання метеорита. Їх класифіковано на кілька груп:

1) тонкі аморфні плівки і кірочки, розвинуті по сколах метеорита (рис. 3, *a*); подекуди кірочки розтріскані і нагадують структуру висохлих колоїдів;

Хімічний склад нікелістого заліза та троїліту метеорита Галків за даними енергодисперсійних досліджень, %

Елемент	Камасит (27)*			Теніт (16)*			Троїліт (23)*		
	мін.	макс.	середнє	мін.	макс.	середнє	мін.	макс.	середнє
Fe	90,54	93,14	92,3	49,18	65,73	59,97	57,22	58,90	58,08
Ni	5,91	7,11	6,5	34,27	50,30	39,7	—	—	—
Co	0,61	1,26	0,93	0	0,83	0,28	0	1,00	0,19
S	—	—	—	—	—	—	41,09	42,58	41,87
Сума			99,73			99,95			100,14

* У дужках — кількість аналізів.



Рис. 3. СЕМ-зображення продуктів вивітрювання на поверхні мінералів хондрита Галків:

a — кірочки, розвинуті на деформованій поверхні зерна камаситу; *b* — скупчення субмікронних кристалів, які розташовані на поверхні силікатних зерен; *c* — скупчення пластинчастих кристалів; *d* — голчасті кристали, що ростуть перпендикулярно до поверхні сколу хондрита

2) розкристалізовані покриви, щільні та потужні, складені орієнтовано розміщеними субмікронними голочками (рис. 3, *b*) і пластинками (рис. 3, *c*); хімічний склад покривів указує на складну суміш мінералів різних груп, серед яких переважають гідроксида заліза;

3) голчасті і пластинчасті кристали, які ростуть перпендикулярно до поверхні сколів (рис. 3, *d*); хімічний склад голчастих утворень, визначений за допомогою енергодисперсійного спектрометра, за площею їх розвитку такий, %: 79,6 FeO; 7,1 SiO₂; 4,3 MgO; 2,7 Al₂O₃; 2,4 Na₂O; 1,5 SO₃; 0,9 CoO; 0,7 MnO; 0,3 Cr₂O₃. Подібні за морфологією утворення отримано в умовах штучного окиснення металевих зерен залізного метеорита Gibeon (IVA), в якому вони ростуть із зовнішнього гематитового шару і складені α-Fe₂O₃ [8];

4) ниркоподібні агрегати (чорного кольору під бінокляром), діагностовано на поверхні камаситу, містять, %: 67,6 Cu; 24,6 S і 7,8 Fe; відповідно до хімічного складу, ці утворення близькі до борніту, який має в метеоритах вторинне походження і належить до продуктів вивітрювання;

5) гідроксидні кульки сірого кольору розміром ≤40 мкм, розміщуються на вивітреної поверхні зерна нікелістого заліза.

Обговорення результатів. У хондриті Галків наявні всі три типи зерен металу, виділені раніше за формою і розмірами зерен [6], але найпоширеніші серед них гілчасті зерна камаситу, що є характерною рисою цього хондрита.

Раніше було виділено чотири типи поверхні зерен нікелістого заліза хондритів: гладенька, полігонально-увігнута, пластинчаста та тонкозерниста [1, 6]. Зазвичай у метеоритах міститься кілька типів зерен. Метеорит Галків містить перші три типи зерен.

Амебоподібна форма зерен, а також їх зубчасті краї інтерпретовано як результат ударного метаморфізму. Крім того, зазначено підвищений вміст включень у металі та їх досить великі розміри [4]. Проведені нами СЕМ-дослідження зерен металу вказують не лише на наявність включень усередині зерен металу, а й на значний їх вміст на поверхні зерен. Таким чином, кристалізація включень інших мінералів на міжфазовій межі зерен металу є додатковим свідченням твердофазової дифузії хімічних елементів у металі з подальшою кристалізацією власних мінералів унаслідок повільного охолодження материнського тіла метеорита. Враховуючи той факт, що хондрит Галків належить до нерівноважних метеоритів, тобто до тих, які зберегли

структурно-мінералогічну і хімічну неоднорідність речовини після акреції материнського тіла, необхідно зробити висновок щодо очищення хімічного складу металу від елементів-домішок не в результаті постакреційного охолодження, а внаслідок повторного охолодження основної маси метеорита від температури ударного нагріву. В цьому відношенні слід також звернути увагу на нетипову кількість і розміри зерен включень у металі. Підвищені їх вміст і розміри є важливим індикатором збагачення доакреційних конденсатів нікелістого заліза такими елементами, як Si, P і Cr, що вказує на специфічні фізико-хімічні умови утворення первинних зерен металу в протопланетній туманності.

Як зазначалося раніше [4], всередині зерен камаситу виявлено наймаєнові лінії, тобто структури зсувних деформацій. Аналогічні структури у вигляді пластинчастих скульптур ми спостерігали на поверхні металевих зерен, що підтверджує факт взаємозв'язку внутрішніх і зовнішніх проявів ударно-метаморфічного перетворення зерен металу. Крім того, на поверхні зерен металу виявлено пори, які за типом поширення, формою і розміром класифіковано як корозійні і є результатом дії ударного метаморфізму на поверхні зерен. Подібні скульптурні елементи виявлено на поверхні зерен нікелістого заліза з метеорита Горлівка [9].

Вперше у полірованому аншліфі метеорита Галків визначено іюцит, який утворив серед силікатів комірчасто-сітчасті структури. Цей мінерал належить до рідкісних акцесорних мінералів звичайних хондритів і утворився або внаслідок ударного метаморфізму, або в зовнішній частині кори плавлення [7]. З огляду на цю знахідку всередині аншліфа метеорита Галків, причому в сітчасто-комірчастих структурах плавлення, можна з упевненістю діагностувати цей мінерал як продукт ударно-метаморфічного перетворення хондрита.

Додатковою ознакою ударно-метаморфічної зміни первинної структури метеорита є наявність у ньому троїліту, який містить у незначній кількості Ni. Попередні дослідження метал-троїлітових асоціацій в ударно-метаморфізованому хондриті однозначно вказують на сульфідизацію зерен металу внаслідок дії ударного метаморфізму, що зумовив розвиток троїліту по зернах металу і утворення Ni-вмісного троїліту другої генерації [10].

Висновки. Структурно-мінералогічні дослідження хондрита Галків дали змогу вперше діагностувати такі акцесорні мінерали, як ільменіт та іюцит, установити особливості скульптури поверхні зерен нікелістого заліза, а також виявити основні умови їх утворення. Результати досліджень однозначно вказують на специфічність фізико-хімічних процесів конденсації первинних зерен металу в газопиловій туманності, що зумовили підвищений вміст Si, P і Cr, а також на значний вплив ударного метаморфізму на формування доземних структурно-мінералогічних характеристик метеорита Галків. Інтенсивність процесів вивітрювання метеорита спричинена характером ударно-метаморфічної зміни хондрита, тобто як збільшенням активної поверхні металу, так і наявністю численних структур деформацій у мінералах.

Автори щиро вдячні В.П.Семененко за допомогу при обговоренні результатів дослідження і написанні статті та науковому співробітнику Д.П.Дьоменку (Інститут ботаніки НАН України) за технічну допомогу під час проведення електронно-мікроскопічних досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Семененко В.П., Тертычная Б.В., Клейманов А.Н. Скульптура поверхности частиц никелистого железа // Метеоритика. — 1987. — Вып. 46. — С. 73—80.
2. Stuffer D., Keil K., Scott E.R.D. Shock metamorphism of ordinary chondrites // Geochim. Cosmochim. A. — 1991. — 55. — P. 3845—3867.
3. Семененко В.П., Гіріч А.Л., Русько Ю.О. Каталог метеоритів, що зберігаються в Національному науково-природничому музеї НАН України (на 1 січня 2007 р.) // Мінерал. журн. — 2007. — 29, № 2. — С. 72—82.
4. Semenenko V.P., Girich A.L. The Galkiv meteorite: H4 chondrite from Ukraine // Meteoritic & Planet. Sci. — 1998. — 33. — P. A193—A196.
5. Ширінбекова С.Н. Порівняльна характеристика ступеня вивітрювання хондритів з метеоритної колекції Національного науково-природничого музею НАН України // Зап. Укр. мінерал. тов-ва. — 2008. — 5. — С. 96—104.
6. Соботович Э.В., Семененко В.П. Вещество метеоритов. — Киев: Наук. думка, 1984. — 191 с.
7. Юдин И.А., Коломенский В.Д. Минералогия метеоритов. — Свердловск: УНТЦ АН СССР, 1987. — 200 с.
8. Visscher C.W., Fegley B. Formation of needles and whiskers during oxidation of the Gibeon IVA iron meteorite // Meteoritics Planet. Sci. — 2001. — 36, N 9. — P. A215.
9. Семененко В.П., Соботович Э.В., Тертычная Б.В. Метеориты Украины. — Киев: Наук. думка. — 1987. — 220 с.
10. Семененко В.П., Самойлович Л.Г., Тертычная Б.В. Изменение зерен троилита при повторном нагреве хондритов // Космическое вещество. — Киев: Наук. думка, 1986. — С. 94—99.

Надійшла 15.04.2009

N.V. Kychan', S.N. Shyrinbekova, V.M. Slyvins'ky

STRUCTURAL-MINERALOGICAL FEATURES
OF FERRONICKEL GRAINS OF GALKIV METEORITE

The results of optical-microscopic and scanning electron-microscopic study of the surface sculpture of single ferronickel grains and polished sections from Galkiv meteorite are given. The results have shown the evidence of shock metamorphism at the Galkiv meteorite. Originally the ilmenite and iocite were diagnosed within the meteorite, and numerous inclusions and sculptures of impact deformation, heating-up and weathering were identified on the surface of metal's grains.