

Рубан А.В., Надточій А.А., Бабуцький В.І., Зінченко О.М., Малий Є.Д., Комар А.С.
Проблема утворення настилу на подині рудовідновлювальної
печі при виробництві феросилікомарганцю:
аналіз фізико-механічних властивостей

Ruban A.V., Nadtochii A.A., Babutskyi V.I., Zinchenko O.M., Malyi E.D., Komar A.S.

The problem of constitution of flooring at the bottom of the
ore furnace during ferosilicomanganese vibration: analysis
of physical and mechanical controls

Мета. На Нікопольському заводі феросплавів при зупинці рудовідновлювальної печі типу РПЗ-63 на капітальний ремонт, її охолодженні та видаленні пухкої шихтової суміші з верхніх горизонтів плавильного простору було виявлено настил, що характеризується високою міцністю, щільністю, кристалічною будовою структури, металевим та графітовим блиском. Труднощі, що виникли під час руйнування футеровки та її вилучення з печі під час зупинки на капітальний ремонт, спостерігалися вперше за десятки років виробництва марганцевих феросплавів. Основною причиною утворення тугоплавкого настилу та наростання її на подині печі є «рваний» режим роботи, обумовлений переведенням печей на роботу за зонним тарифом і, мабуть, скороченням часу роботи печей на виплавці високовуглецевого феромарганцю, що сприяє руйнуванню карбідів та промиванню ванни печей. **Методика.** У роботі виконані дослідження щодо визначення дрібності, міцності, питомої роботи руйнування, а також об'ємної, істинної, насипної щільності настилу з печі та деяких руд марганцю, проведено дослідження пористості цих матеріалів. **Наукова новизна.** Хімічний аналіз проб виломок, відібраних у різних місцях настилу та на різних горизонтах, показав, що всі вони, в основному, представлені шлакометалевим конгломератом, що містить карбід кремнію (SiC), відновленими Mn, Fe, Si, P, Ti, S; шлакова складова представлена оксидами CaO, MgO, Al₂O₃ та R₂O. У деяких пробах спостерігається від 0,8 до 6,5% Pb. **Практична значимість.** Представлені дані щодо вивчення фізико-механічних властивостей зразків проб виломок, відібраних у різних місцях настилу та на різних горизонтах печі. Дослідження фізико-механічних властивостей виломок показали їх високі характеристики міцності, які в 2-18 разів вище в порівнянні з марганцевою рудою, що і обумовлює значні труднощі з їх руйнування в твердому стані і витягу з ванни РТП при її зупинці на капітальний ремонт.

Ключові слова: рудовідновлювальна піч, феросилікомарганець, настил, карбід кремнію, фізико-механічні властивості.

Objective. At the Nikopol Ferroalloy Plant, during the shutdown of the RPZ-63 ore-reducing furnace for major repairs, its cooling and removal of the loose charge mixture from the upper horizons of the smelting space, a lining characterized by high strength, density, and crystalline structure was discovered. The difficulties that arose during the destruction of the lining and its removal from the furnace during the shutdown for major repairs were observed for the first time in decades of manganese ferroalloy production. The main reason for the formation of the refractory lining and its build-up on the furnace bottom is the "torn" operating mode caused by the transfer of furnaces to work according to the zone tariff and, apparently, a reduction in the operating time of furnaces for smelting ferromanganese, which contributes to the destruction of carbides and the washing of the furnace bath. **Methodology.** The paper presents studies to determine the fineness, strength, specific work of destruction, as well as the volumetric, true, bulk density of the furnace deck and some manganese ores, and studies of the porosity of these materials. **Scientific novelty.** Chemical analysis of the debris samples collected in different places of the deck and at different horizons showed that they are all mainly represented by a slag-metal conglomerate containing silicon carbide (SiC), reduced Mn, Fe, Si, P, Ti, S; the slag component is represented by oxides of CaO, MgO, Al₂O₃ and R₂O. Some samples contain from 0.8 to 6.5% Pb. **Practical significance.** The paper presents data on the study of the physical and mechanical properties of the debris samples collected in different places of the deck and at the furnace horizons. Studies of the physical and mechanical properties of the scraps have shown their high strength characteristics, which are 2-18 times higher than those of manganese ore, which causes significant difficulties in their destruction in the solid state and extraction from the RTP bath when it is stopped for major repairs.

Key words: ore-reducing furnace, ferosilicon manganese, flooring, silicon carbide, physical and mechanical properties.

Вступ. Виробництво феросилікомарганцю на Нікопольському заводі феросплавів у закритих та герметичних печах підвищеної потужності типу РПЗ-63 та РКГ-81, освоєння якого розпочато більше 50 років тому, є одним із найпередовіших та знаходиться на світовому рівні. Високий

технологічний рівень виробництва, надійність та довгостроковість експлуатації плавильних агрегатів збільшена з 3-5 місяців до 20-30 років, належна культура виробництва, механізація та автоматизація технологічних процесів, вирішені питання охорони навколишнього середовища та

© Рубан А.В. – к.т.н., доц УДУНТ
 Надточій А.А. – к.т.н., доц УДУНТ
 Бабуцький В.І. – УДУНТ
 Зінченко О.М. – УДУНТ
 Малий Є.Д. – УДУНТ
 Комар А.С. – УДУНТ

© Ruban A.V. – c.t.s., docent USUST
 Nadtochii A.A. – c.t.s., docent USUST
 Babutskyi V.I. – USUST
 Zinchenko O.M. – USUST
 Malyi E.D. – USUST
 Komar A.S. – USUST



This is an Open Access article under the CC BY 4.0 license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

утилізації вторинних матеріалів дозволили заводу здобути авторитет та визнання у світовому науково-технічному співтоваристві електротермістів.

Рудовідновлювальна піч типу РПЗ-63 № 1 цеху виробництва феросплавів введена в експлуатацію в квітні 1995 року і, пропрацювавши понад 22 роки, була зупинена на капітальний ремонт із повною заміною футерування ванни. За період роботи до капітального ремонту на печі № 1 було вироблено 1,106 млн. т феросилікомарганцю та 0,244 млн. т високовуглецевого феромарганцю.

При зупинці печі на капітальний ремонт, її охолодженні та видаленні пухкої шихтової суміші з верхніх горизонтів плавильного простору було виявлено настилу, що характеризується високою міцністю, щільністю, кристалічною будовою структури, металевим та графітовим блиском. Труднощі,

що виникли під час руйнування футеровки та її вилучення з печі під час зупинки на капітальний ремонт, спостерігаються вперше за 50 років виробництва марганцевих феросплавів.

Мета та завдання досліджень. Топографія настилу, місця відбору проб наведено на рис. 1, з якого видно, що настил розташовувався по всій площі ванни майже безперервним шаром і мав різну висоту у різних районах печі.

Зокрема, по півдні ванни (за передньою стінкою) його висота зростала у напрямку від фази А (500 мм вище осі льотки) до фази С (до 1100 мм вище осі льотки). На півночі висота настилу була більша і досягала 1300 мм від рівня осі льотки. З метою визначення складу настилу проводили відбір проб у різних точках ванни печі.

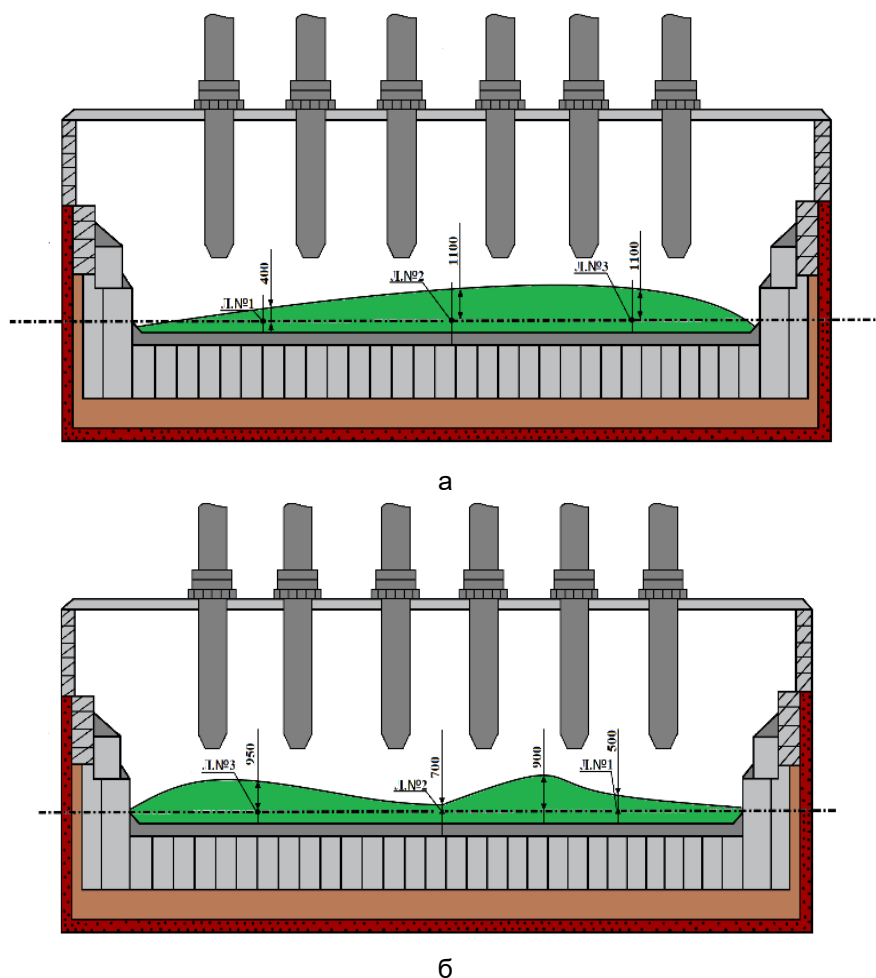


Рис. 1. Вид настилу по північній частині (а) і по південній частині (б) печі РПЗ-63

Результати хімічного аналізу матеріалу (табл. 1. проби №№ 1-3, 5-7, 9, 10) показали, що його склад представлений конгломератом, що складається з металу - переважно феросилікомарганцю, карбіду кремнію, з незначними домішками шлакової фази.

Основною причиною заростання подины ванни була експлуатація печі на низькій потужності трансформатора (у тому числі з періодичними

відключеннями печі), обумовлена технічним графіком роботи з зонного тарифу використання електроенергії, а також неодноразовими тривалими холодними простоями печі в періоди зниження попиту на марганцеві феросплави на ринку. У ці моменти відбувається карбідоутворення в коксовому шарі при надлишку вуглецю і наявності кремнезему.

Таблиця 1 - Хімічний склад зразків виломок настилу подини ванни печі №1

№ проби та місця відбору	Вміст, мас. %												
	C	Mn	Si	Fe	S	P	Pb	Ti	SiC	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	R ₂ O
1. Настил у районі фази А на 1-1,5 м вище осі льотки (центр ванни)	11,0	49,3	18,4	10,9	н.д.	0,18	-	0,45	4,6	1,8	0,9	1,1	0,6
2. Настил у районі фази А на 0,5-1 м вище осі льотки (за блоками передньої стінки)	9,7	25,8	30,6	3,9	0,56	0,09	-	0,6	20,4	6,7	3,4	3,9	1,0
3. Настил у районі фази А задня стінка на 0-0,5 м вище осі льотки	8,4	26,2	30,6	4,9	1,4	0,08	1,5	5,2	19,2	4,4	1,9	2,1	1,1
4. Настил у районі фази А задня стінка на 0-0,5 м нижче осі льотки	8,1	22,0	24,4	3,3	1,6	0,06	6,5	2,2	18,4	7,2	2,9	4,4	2,0
5. Настил між фазами А і В на рівні осі льотки	10,8	20,3	34,7	3,3	н.д.	0,08	-	2,4	31,5	6,3	2,8	3,2	1,1
6. Настил між фазами А і В на 0,5 м нижче осі льотки	11,5	20,2	28,1	3,4	0,6	0,07	-	1,8	15,0	8,1	3,7	3,8	1,9
7. Настил у районі фази В за передньою стінкою на 0-0,5 м нижче осі льотки	14,2	20,9	36,0	6,1	0,65	0,08	-	2,3	24,6	4,3	2,1	2,5	0,8
8. Настил у районі фази В у цегляній кладці подини (центр ванни)	4,7	73,5	8,0	10,8	0,01	0,14	0,8	-	-	-	-	2,0 Al	-
9. Настил у районі фази С на рівні осі льотки	9,3	20,5	32,2	3,2	н.д.	0,08	-	3,3	26,0	7,0	3,4	3,7	1,6
10. Настил у районі фази С за передньою стінкою на 0-0,5 м нижче осі льотки	19,2	23,9	26,9	5,5	0,3	0,11	-	0,8	16,3	5,0	2,3	2,7	1,0

Зважаючи на наявність у складі настилу структурно міцного карбиду кремнію, для видалення настилу необхідно великих трудо- та механічних витрат, що значно продовжило термін виконання ремонту. Усього було вивезено 192,8 т великих шматків настилу, а з урахуванням дрібних фракцій їх загальна вага перевищила 200 т.

Основні цілі та завдання досліджень лежать у визначенні фізико-хімічних та фізико-механічних властивостей зразків виломок настилу, встановлення умов та механізм їх утворення, розробка рекомендацій, що спрямовані на виключення можливості отримання тугоплавких, важко видалених у твердому стані сполук на подині рудотермічної печі та їх виведення з ванни печі перед зупинкою на капітальний ремонт. У цій роботі представлені дані щодо вивчення фізико-механічних властивостей зразків проб виломок, відібраних у різних місцях настилу та на різних горизонтах печі.

Результати досліджень та їх обговорення. Карбід кремнію є твердою тугоплавкою речовиною. Кристалічна решітка найпоширенішого політипа аналогічна решітці алмазу. Стандартна ентальпія утворення (298 К, кДж/моль): - 66,1; стандартна енергія Гіббса (298 К, кДж/моль): - 63,7; стандартна ентропія утворення (298 К, кДж/моль): + 16,61; стандартна мольна теплоємність (298 К, кДж/моль·К): + 26,86. Характер кристалічної

решітки – атомний. Енергія кристалічної решітки 299 ккал/г форм. Карбід кремнію є єдиною бінарною сполукою, що утворюється елементами IV групи Періодичної таблиці елементів Д.І. Менделєєва. За типом хімічного зв'язку карбід кремнію відноситься до ковалентних кристалів. Частка іонного зв'язку, обумовленої деякою відмінністю в електронегативності атомів Si і C, не перевищує 10-12%. Енергія ковалентного зв'язку між атомами кремнію та вуглецю в кристалах SiC майже втричі перевищує енергію зв'язку між атомами в кристалах кремнію. Завдяки сильним хімічним зв'язкам, карбід кремнію виділяється серед інших матеріалів високою хімічною та радіаційною стійкістю, температурною стабільністю фізичних властивостей, великою механічною міцністю та високою твердістю. В інертній атмосфері карбід кремнію розкладається при температурі вище 2000 °С. Карбід кремнію безбарвний, наявність домішок забарвлюють його у зелений чи чорний колір.

У роботі виконані порівняльні дослідження щодо визначення дрібності, міцності, питомої роботи руйнування, а також об'ємної, істинної, насипної щільності настилу з печі та деяких руд марганцю (згідно ДСТУ 3207-95 [1]). Для порівняння також проведено дослідження пористості цих матеріалів.

Для оцінки відносної опірності матеріалів руйнуванню при переробці мінеральної сировини у

гірничій промисловості використовується коефіцієнт та шкала міцності, що запропонована проф. М.М. Протодьяконовим [2-3]. За одиницю міцності прийнято величину тимчасового опору одновісному стиску, що дорівнює $9,8 \text{ н/мм}^2$ (2 кгс/мм^2), визначена на зразках кубічної форми зі стороною 50 мм.

Міцність є величиною-характеристикою мінеральної сировини і може змінюватися від значення 2-3 до 26-28 балів, а в окремих випадках (для залізистих кварцитів) досягати до 30 балів і вище. Вона визначається хімічним складом, генезисом, структурою та твердістю мінералів.

Визначення коефіцієнта тривкості шляхом роздавлювання зразків правильної форми прийнято вважати основним способом. Однак не завжди можна відібрати представницьку пробу для виготовлення зразків правильної форми. Тому для визначення коефіцієнта тривкості рекомендується метод визначення питомої роботи дроблення (метод товчення) [4]. Рекомендований метод поширюється на тверді мінеральні руди та встановлює метод визначення коефіцієнта їхньої міцності за шкалою М.М. Протодьяконова.

Сутність самого методу полягає у визначенні коефіцієнта міцності, пропорційного відношенню роботи, витраченої на дроблення мінеральної сировини, до новоутвореної при дробленні поверхні, яку оцінюють сумарним об'ємом частинок крупністю 0,5 мм.

Дроблення відбувається у складному напруженому стані, де матеріал піддається стиску, розтягуванню, зсуву та згину одночасно, що більшою мірою моделює процес його дроблення та подрібнення у млині.

Витрачену на дроблення роботу (A) визначають шляхом множення маси гір, кількості скидань, висоти скидання та числа наважок

$$A = 5 \cdot H \cdot m \cdot n, \text{ кГм},$$

де 5 – кількість наважок; H – висота скидання, м; m – маса гір, кг; n – кількість скидань.

Питому роботу дроблення мінеральної сировини (a), тобто роботу, витрачену на утворення 1 см^3 дрібниці, обчислюють за формулою

$$a = A / V, \text{ кГм/см}^3,$$

де A – витрачена на дроблення робота, кГм/см³; V – об'єм дрібниці, що утворилася, см³.

Між коефіцієнтом міцності та питомою роботою дроблення встановлена статистична залежність, що має вигляд:

$$f = 1,98 a^{0,7},$$

де f – коефіцієнт міцності за шкалою проф. М.М. Протодьяконова; 1,98 – постійний коефіцієнт; a – питома робота дроблення.

Основне завдання досліджень полягало в отриманні максимальної інформації про властивості та речовий склад проб, необхідних для опрацювання методики досліджень та технологічних схем обробки. У процесі досліджень вивчалися фізичні властивості та паралельно хімічний склад. Фізико-механічні властивості марганцевих руд та настилу РВП-1 наведені в табл. 2.

Метод випробування на ударну в'язкість зразків [5] заснований на руйнуванні зразка із концентратом посередині одним ударом маятникового копра.

В результаті випробування визначають повну роботу, витрачену при ударі (роботу удару) або ударну в'язкість. Під ударною в'язкістю слід розуміти роботу удару, віднесену до початкової площі поперечного перерізу зразка в місці концентратора.

Величина роботи деформації та руйнування K визначається різницею потенційних енергій маятника в початковий (після підйому на кут α) та кінцевий (після зльоту на кут β) моменти випробування:

$$K = P \cdot (H - h),$$

Таблиця 2 - Фізико-механічні властивості марганцевої руди та настилу РВП-1

Проба	Найменування матеріалу	Дробимість, %			Міцність, бал.			Питома робота руйнування, МДж/м ³			Щільність, кг/м ³			Пористість, %
		мін.	макс.	серед.	мін.	макс.	серед.	мін.	макс.	серед.	наспина	об'ємна	істинна	
1	Руда Mn (43,4 % Mn)	25,7	50,0	39,4	2,3	4,0	3,2	12	28	20	1480	2530	3860	34,5
2	Руда Mn (28,8 % Mn)	36,9	59,6	48,2	3,1	4,8	3,8	18	36	26	1520	2620	3320	21,1
3	Настил РВП-1	86,9	92,5	91,5	10,3	14,0	13,1	125	162	148	1390	1820	2500	23,62

де P – вага маятника, кг; H ,

h – висота підйому та зльоту маятника, відповідно, м.

При даній схемі випробувань вага маятника P складала 5 кг, а довжина маятника L – 0,7 м.

Якщо довжина маятника L , то $h = L \cdot (1 - \cos\beta)$, $H = L \cdot (1 - \cos\alpha)$ і, отже, робота деформації та руйнування буде

$$\text{для зразку №1: } K_1 = P \cdot L (\cos\beta - \cos\alpha) = 5 \cdot 0,7 (\cos 70^\circ - \cos 75^\circ) = 0,291 \text{ кг} \cdot \text{м} = 2,91 \text{ Н} \cdot \text{м} = 2,91 \text{ Дж};$$

$$\text{для зразку №2: } K_2 = 0,233 \text{ кг} \cdot \text{м} = 2,33 \text{ Н} \cdot \text{м} = 2,33 \text{ Дж};$$

$$\text{для зразку №3: } K_3 = 0,348 \text{ кг} \cdot \text{м} = 3,48 \text{ Н} \cdot \text{м} = 3,48 \text{ Дж}.$$

Знаючи повну роботу деформації та руйнування K , можна розрахувати основну характеристику, одержувану в результаті випробувань, що розглядаються, – ударну в'язкість

$$K \cdot C = K/F,$$

де F – площа поперечного перерізу зразка у місці надрізу до випробування. У разі, зразки мали перетин 10×10 мм, тобто 1 см^2 . Стандартна розмірність ударної в'язкості Дж/см². Отримані дані наведено у таблиці 3.

Таблиця 3 - Результати випробувань щодо визначення ударної в'язкості зразків

Параметри	Початковий кут, α	Кут зльоту маятника, β	Робота деформації та руйнування, K , Дж	Ударна в'язкість, KC , кДж/м ²
для зразку № 1	75	70	2,91	29,1
для зразку № 2	75	71	2,33	23,3
для зразку № 3	75	69	3,48	34,8
Середнє значення			2,91	29,1

Для порівняння та оцінки значень отриманих показників нижче наведено дані щодо величин ударної в'язкості деяких матеріалів (див. табл. 4). Під в'язкістю матеріалу розуміють його властивість чинити опір силам, які прагнуть відокремити деяку

частину матеріалу від масиву або перемістити одну його частину по відношенню до іншої. Вона характеризує величину сил зчеплення між частинками. Дані за значеннями ударної в'язкості різних матеріалів наведено у табл. 4.

Таблиця 4 - Ударна в'язкість матеріалів

Найменування матеріалу	Ударна в'язкість, KC , кДж/м ²
Азбест	1,5-1,6
Сімінали	2,5
Скло	1,5-2,5
Ситали	4,5-10,5
Карбоволокніти	44-84
Бороволокніти	78-110
Сплави титану	300-500
Сталі леговані	400-1000
Сталі, леговані після термообробки	1000-1300
Орговолокніти	500-600

Досліджуваний матеріал у порівнянні з сіміналами (синтетичні мінеральні сплави), отриманими за технологією кам'яного лиття, які мають фізико-механічні властивості, близькі до ударостійкої кераміки, що використовується для кульозахисних броньових пластин (щільність $2,9 \text{ г/см}^3$, межа міцності при стисканні 450 МПа , межа міцності на вигин 50 МПа , мікротвердість 15 МПа , ударна в'язкість $2,5 \text{ кДж/м}^2$ [6]), характеризується показником ударної в'язкості на порядок вище. Для більш досконалого вивчення цього питання необхідні подальші експериментальні та теоретичні дослідження.

Надалі плануються дослідження визначення фазового складу зразків методом рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА) на установці SELM1 PEM-106I, і мінералогічного складу у відбитому світлі, що проходить, на мікроскопах «NU» і біокуляроному мікроскопі МБС-9.

Висновки. Настил, який був виявлений при зупинці рудовідновлювальної печі типу РПЗ-63 № 1 цеху виробництва феросплавів, займає практично всю площу подини, утворивши «хибну» подіну товщиною $400-1300$ мм вище за рівень осі льоток, що викликало великі труднощі при її руйнуванні та вилученні з ванни. Причиною утворення настилу на подині печей є переведення їх на технічний графік роботи за зонним тарифом використання електроенергії, тривалі холодні простой та скорочення об'єму виробництва високовуглецевого феромарганцю, що сприяє розмиванню карбідних утворень. Дослідженнями фізико-механічних властивостей зразків виломок виявлено високі характеристики міцності матеріалу настилу. Необхідні подальші експериментальні та теоретичні дослідження матеріалу настилу печі для визначення можливості використання його в якості кульозахисних броньових пластин.

Перелік посилань

1. ДСТУ 3207-95. Руди залізні і марганцеві, концентрати, агломерати і окатки. Метод визначення дійсної, об'ємної, насипної щільності і пористості. На заміну ГОСТ 25732-88. Чинний від 01.01.2000. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2000. 23 с.
2. Адрианов Б.И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов. М.: Химия, 1982. 255 с.
3. Чаповский Е.Г. Инженерная геология. М.: Высшая школа, 1975. 296 с.
4. Папушин Ю. Л., Смирнов В. О., Білецький В. С. Дослідження корисних копалин на збагачуваність. Донецьк: Східний видавничий дім, 2006. 344 с. ISBN 966-317-002-6. Режим доступу: <https://surl.li/jcvncw>
5. Опір матеріалів. Підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський. За ред. Г. С. Писаренка. К.: Вища школа, 1993. 655 с.
6. Игнатова А.М., Артемов А.О., Игнатов М.Н. Исследование пулестойкости синтетических минеральных сплавов. *Фундаментальные исследования*. 2013. № 10-2. С. 261-265.

Referens

1. State Standard of Ukraine 3207-95. (2000). *Rudy zalizni i marhantsevi, kontsentraty, ahlomeraty i okatky. Metod vyznachennia diisnoi, obiemnoi, nasyanoi shchilnosti i porystosti*. Na zaminu State Standard 25732-88. UkrNDNTS
2. Adrianov, B. I. (1982). *Metody opredeleniia strukturno-mekhanicheskikh kharakteristik poroshkoobraznykh materialov*. Khimiia
3. Chapovskii, E. G. (1975). *Inzhenernaia geologiya*. Vysshiaia shkola
4. Papushyn, Yu. L., Smyrnov, V. O., & Biletskyi, V. S. (2006). *Doslidzhennia korysnykh kopalyn na zbahachuvanist*. Skhidnyi vydavnychiy dim. <https://surl.li/jcvncw>
5. Pysarenko, H. S., Kvitka, O. L., Umanskyi, E. S (1993). *Opir materialiv*. Vyshcha shkola
6. Ignatova, A. M., Artemov, A. O., Ignatov, M. N. (2013). Issledovanie pulestoikosti sinteticheskikh mineralnykh splavov. *Fundamentalnye issledovaniia*, (10-2), 261-265

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.12.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.12.2024