

УДК 669.15'74-198:669.018.5

Шевченко Д. В., Мельник С. О., Приходько С. В., Акреев В. В., Овчарук А. М.

## Особливості виплавки феронікелю в умовах виснаження латеритних руд з використанням в якості відновників вугілля енергетичних груп

Shevchenko D. V., Melnyk S. O., Prykhodko S. V., Akreev V. V., Ovcharuk A. M.

### Peculiarities of ferronickel smelting in conditions of depletion of laterite ores using coal of energy groups as reducing agents

**Анотація.** Нікель є найважливішим легуючим елементом в аустенітній нержавіючій сталі та інших спеціальних сплавах. Різке збільшення виробництва таких сплавів протягом останніх десятиліть значно збільшився попит на феронікель. Щоб задовольнити збільшення промислового попиту, необхідні нові та ефективніші шляхи для вилучення нікелю з бідних і складніших руд за умов виснаження запасів багатих нікелевих руд. Узагальнено досвід роботи в галузі освоєння та експлуатації технології електроплавки феронікелю та викладено досягнуті показники рудотермічної печі потужність 40 MWA та особливості процесу технології низького відновлення заліза та вибір оптимального відновника процесу.

Вивчення процесів твердофазного відновлення заліза з оксидів з використанням в якості відновника вугілля антрацитових та енергетичних груп та розробка енергоефективних технологій отримання та застосування огарку з нікелевих руд, отриманого внаслідок випалювання в трубчастій обертовій печі, є актуальним науковим напрямом у кольоровій металургії. Отримано залежності співвідношення вугілля (відновників), що використовуються надалі для відновлення металів у рудотермічній печі. У результаті вивчення процесу відновлення заліза з нікелевої руди визначено оптимальні співвідношення вугілля марок ДГ і АС (75%/25%) при температурі 850-950 °С, що призводить до зниження витрати палива за рахунок горіння летких з вугілля, а також зниження витрати електроенергії під час плавлення огарку в рудотермічній печі.

**Ключові слова:** латерити, рудотермічна піч, огарок, технологія низького відновлення заліза, твердофазне відновлення заліза з оксидів, ступінь металізації, вугілля енергетичних груп

**Abstract.** Nickel is the most important alloying element in austenitic stainless steel and other special alloys. A sharp increase in the production of such alloys in recent decades has significantly increased the demand for ferronickel. To meet increasing industrial demand, new and more efficient ways to extract nickel from poorer and more complex ores are needed as nickel-rich ores are depleted. The work experience in the development and operation of ferronickel electrosmelting technology is summarized and the achieved indicators of the 40 MWA ore-thermal furnace and process features of low iron recovery technology and the selection of the optimal process reducer are outlined.

The study of processes of solid-phase reduction of iron from oxides using coal of anthracite and energy groups as a reducing agent and the development of energy-efficient technologies for obtaining and using cinders from nickel ores, obtained as a result of firing in a tubular rotary furnace, is an actual scientific direction in non-ferrous metallurgy. The dependences of the ratio of coal (reducing agents) used in the future for the reduction of metals in the ore-thermal furnace were obtained. As a result of the study of the iron recovery process from nickel ore, the optimal ratio of LG and AS coal was determined (75%/25%) at a temperature of 850-950 °C, which leads to a decrease in fuel consumption due to the burning of volatiles from coal, as well as a decrease in electricity consumption during cinder melting in an ore-thermal furnace.

**Key words:** laterites, ore-thermal furnace, cinder, technology of low iron reduction, solid phase reduction of iron from oxides, degree of metallization, coal of energy groups

Основна сфера застосування нікелю – металургія, 67% видобутого нікелю йде на сплави заліза. Пояснюється це тим, що сам нікель при обробці надає отриманій сировині такі ж антикорозійні властивості, якими він має сам. Саме з цієї причини цей метал особливо актуальний для виготовлення нержавіючої сталі. Додавання нікелю як легуючого елемента для стабілізації структури аустеніту підвищує корозійну стійкість сталі, високотемпературні властивості, зварюваність, формуваність і стійкість до агресивних середовищ.

У 2022 році світовий ринок феронікелю оцінювався в 15170 мільйонів доларів США і, як очікується, досягне 21640 мільйонів доларів США до 2029 року [1], при чому найбільшим ринком є Китай з частиною близько 90 %, за ним ідуть Європа та Америка, обидві мають частку понад 2 %. У 2022 році ціна на нікель у середньому складала 25 605 доларів США за тону, що на 38% більше, ніж у середньому у 2021 році.

Україна має невеликі запаси силікатів нікелю, пов'язаних із корою вивітрювання ультрабазитів у Побужжі та Центральних регіонах Дніпра. 12 родовищ нікелю містять 217,8 тис. тон балансових та 121,2 тис. тон позабалансових запасів. У [2] вважають, що перспективними для видобутку нікелю є сульфідно мідно-нікелеві родовища, зокрема Прутівська ділянка, розташована в Житомирській області.

Побузький феронікелевий комбінат – єдине в Україні підприємство, яке виробляє у промислових масштабах феронікель із бідних окислених руд, що містять нікель.

Промисловий інтерес латеритів складають три види мінералів: лимоніт (вміст нікелю, як правило, від 1,0 до 1,5% масою, досить однорідного складу), сапроліт (вміст нікелю у яких близько 1,8 до 2,5% за масою), перехідні мінерали.

Крім того, підвищений попит на нікель призводить до того, що в переробку залучаються руди з небажаними проблематичними у піромета-

лургійній переробці показниками кислотності (S/M), високим вмістом гетиту, що збільшує співвідношення Fe/Ni. Ці руди створюють практичні проблеми при експлуатації печей, таких, наприклад, як:

- наявність великої кількості вільного кремнезему та гетиту обмежують температуру випалу огарка, для запобігання його спіканню в трубчастій печі, і як наслідок, збільшує питомі витрати електроенергії при плавленні шихти в електропечі;
- збільшення кислотності S/M призводить до наявності проблем, пов'язаних з електричними режимами роботи печей, а також кипіння (спінювання) розплаву шлаку, і як наслідок, призводить до аварійності самоспінних електродів.

Основним обмежуючим фактором є те, що не всі потенційні руди можуть (або повинні) бути переплавлені в довільні сорти феронікелю.

Усі феронікелеві заводи потрапляють у дві групи, що відрізняються ступенем відновлення заліза із руди:

низьке відновлення, яке відновлює від 15% до 30% заліза з руди;

високе відновлення, яке відновлює від 45% до 65% заліза з руди. У тому числі виробники нікелевого чавуну. Забезпечують рівень відновлення заліза в діапазоні від 70% до 80%.

Таким чином, кожен процес повинен починатися з визначення його оптимального ступеня відновлення заліза і відповідно сорту феронікелю [3]. Це визначення вимагає наступних кроків: визначення оптимального сорту феронікелю та оцінка металургійної доцільності цього оптимального сорту. Зупинимось на кожному більш докладно.

Очевидно те, що виробництво феронікелю з нижчим вмістом нікелю призводить до нижчої втрати нікелю в шлаковій фазі з двох причин: через низький вміст нікелю в шлаку і менших обсягів власне шлаку.

При цьому більш високе відновлення вимагає більше відновника і більших витрат енергії на тону проплавленого недогарка.

Таким чином, для будь-якої заданої руди та плавильної печі існує максимальний рівень виробництва нікелю, де зростання ступеня відновлення врівноважується зниженням обсягів проплаву руди.

На рисунку 1 наведені ці кореляції в залежності від ступеня відновлення заліза для руди з вмістом 1,6% Ni, 16% Fe, та 2,2 S/M [3]. Різка зміна нахилу кривої маси шлаку, на рівні близько 45% відновлення заліза, відбувається через окиснення кремнію при виробництві феронікелю.

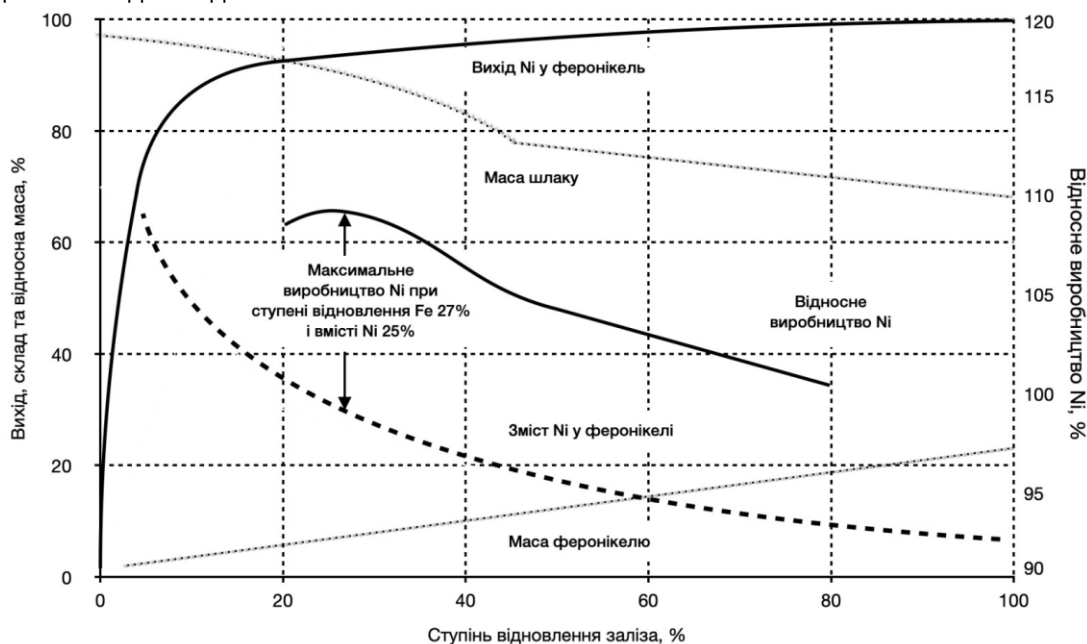


Рисунок 1 - Залежність складу нікелю, виходу, виробництва феронікелю та шлаку від ступеня відновлення Fe

З другої сторони, вибір складу феронікелю є компромісом між оптимальним для даної руди (плавильної печі) та ймовірною стабільністю та довговічністю роботи за такого ступеня відновлення. Таким чином, цей вибір не може бути довільним на основі ідеї щодо затребуваності певного сорту феронікелю.

Технологічна схема виробництва феронікелю, яка постійно удосконалювалася [4], включає: сушіння руди з вмістом вологи 35 % до вологості 20-

23 %, яку можна дозувати та змішувати з вуглецьвмісним відновником; отримання недогарка у трубчастих обертових печах (ТОП) за температури 700-900 °C. На цьому етапі підготовки сирини використовувалися різні енергоносії – мазут, природний газ, пиловуглецеве паливо (ПВП). Електроплавка недогарка виконується в 2-х рудотермічних печах РТП-1 та РТП-2 з установленою потужністю трансформаторів 42 МВ.

У цій роботі представлено контроль параметрів рудотермічної печі потужністю 40 MWA при зміні складу виробленого феронікелю. Початковий період роботи рудотермічної печі відповідав усталеній технології високого відновлення заліза з додаванням до рудної суміші флюсів у вигляді вапняку та відновника антрацитової групи [5].

Аналіз залежності зміни сорту феронікелю зі зниженням вмісту в ньому нікелю з 20% до 10% при збільшенні переробки лимонітів з більш високим вмістом заліза та нижчим вмістом нікелю показав, що збільшення частини лимонітів в перероблених рудах призводило до стабільної зміни сорту феронікелю, зменшуючи частку нікелю в феронікелі і роблячи процес більш економічно недоцільним. Проблематика підтримки стабільності технологічного процесу, погіршення сорту феронікелю та зниження економічної ефективності виробництва зумовили пошук шляхів переведення печі з технології високого відновлення на технологію низького відновлення заліза.

Через неможливість подальшого збільшення потужності рудотермічної печі на величину більше 25 МВт через критичну температуру металу, що могло вкрай негативно позначитися на стабільності конструкції печі, включаючи вогнетривку футеровку, подальше технологічне управління рудотермічною піччю було можливим за технологією ни-

зького відновлення. Для чого виконано зміну типу відновника, що використовується, з антрацитової марки вугілля на енергетичні, приблизного наступного складу: зола – 10,8%; леткі – 34,5%; сірка – 0,5%; та контролем фракційного складу.

Період виходу в робочий режим низького відновлення рудотермічної печі був пов'язаний зі стабілізацією шлакового режиму та вирішенням практичних завдань:

визначення оптимальної питомої витрати електроенергії;

робота на електричних режимах, що забезпечують оптимальну температуру чорного феронікелю та електропічного шлаку;

зниження рівня шлаку, що спінився, в печі, що збільшується при вмісті вуглецю в огарку більше 1% і знижується при падінні вуглецю в недогарку менше 1%.

Вміст залишкового вуглецю в огарку при постійному дозуванні відновника залежить від активності відновника та його фракційного складу, часу знаходження матеріалу у ТОП та температурного профілю ТОП. Переважно використання «молодого» вугілля, з високим вмістом летких та фракційним складом - 6 мм > 95% [6].

Досягнуті показники роботи рудотермічної печі на ТНВ представлено в таблиці 1 [5].

Таблиця 1 – Показники роботи рудотермічної печі за різними технологіями

Показники роботи	Технологія високого відновлення заліза	Технологія низького відновлення заліза
потужність печі	до 41 МВт;	37МВт
відновлення заліза	60-65%;	до 15%
питома витрата електроенергії	620 кВтг/т огарка	583 кВтг/т огарка
питома витрата вапняку	до 67 кг/т	0кг/т
питома витрата відновника	52-77,7 кг/т (залежно від типу відновника)	36,6 кг/т
вихід огарка із руди	до 106 %	91,0%
вміст нікелю в чорновому феронікелі	до 14%;	45%
вміст вуглецю в чорновому феронікелі	до 3,5%	до 0,02%;
вміст кремнію в чорновому феронікелі	3,5-4,5%.	0,01%

З урахуванням роботи двох рудотермічних печей, одна з яких працює з високим ступенем відновлення заліза, інша – з низьким ступенем відновлення заліза, досягнуто потенціалу виробництва можливого повного спектру сортів феронікелю, з вмістом нікелю в товарному феронікелі від 18 % до 70 %.

Як говорилося раніше, на етапі підготовки сирини для ТОП використовуються різні енергоносії – мазут, природний газ, пилувуглецеве паливо (ПВП). Одним із потенційних відновників, які можуть бути використані в трубчастій обертовій печі, є вугілля енергетичних груп. Вугілля має високий вміст вуглецю, що дозволяє йому виступати як відновник, забезпечуючи процес твердофазного відновлення заліза з оксидів нікелевої руди.

Дослідження проведено на ТОП-1 в умовах діючого виробництва ТОВ "Побужський феронікеле-

вий комбінат". Основні характеристики ТОП-1: довжина 70 м, радіус 4,5 м, кут нахилу 3° [7].

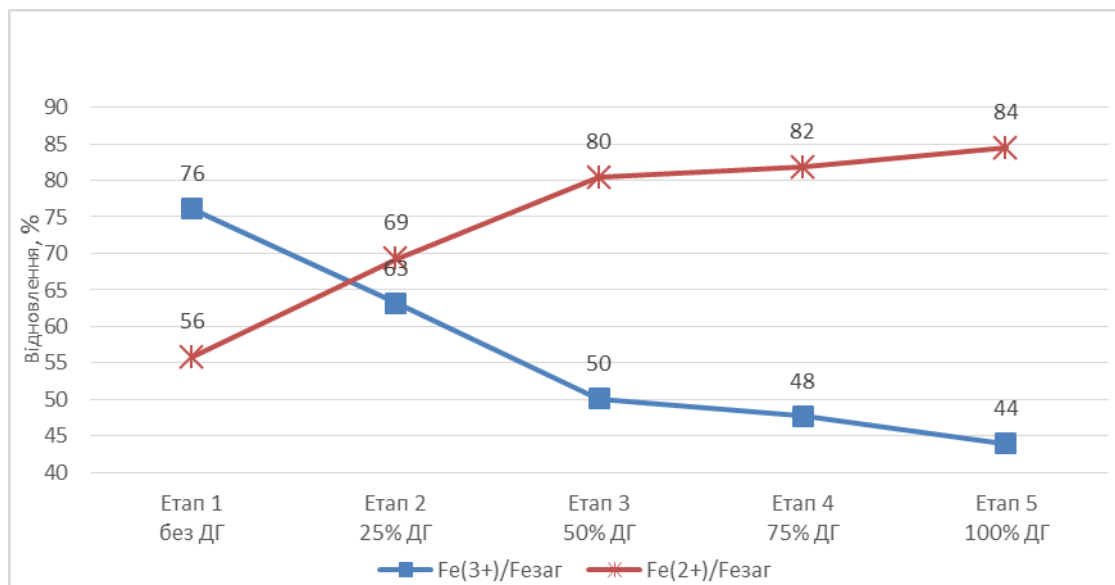
У період проведення досліджень на кожному етапі відібрано проби руди та огарку для виконання хімічного аналізу з визначенням Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, Fe<sub>общ</sub>, Fe<sub>мет</sub> та вологи. Хімічний склад вугілля виконаний перед початком проведення досліджень залишався постійним протягом усього періоду випробувань [8].

Для вугілля марки ДГ характерний підвищений вміст летких 25 мас. %. Горіння летких речовин забезпечує необхідні умови для твердофазного відновлення в процесі обпалу. За цих умов основна частина тривалентного оксиду заліза відновлюється до двовалентного. Спостерігається також відновлення оксиду заліза до металу. Відсотковий вміст FeO в огарку з використанням вугілля марки ДГ порівняно із завантаженням без добавки вугілля марки ДГ до складу відновників збільшився з

1,29 до 1,70 рази, в залежності від співвідношення вмісту вугілля «ДГ» (25%, 50%, 75% та 100%) [8].

Як показано на рисунку 2, зі збільшенням відсоткового вмісту вугілля марки ДГ у відновнику відношення  $Fe^{(2+)}/Fe_{(зар)}$  підвищується і відповідно відношення  $Fe^{(3+)}/Fe_{(зар)}$  знижується, що характерно для протікання процесів твердофазного відновлення.

Основними характеристиками процесу твердофазного відновлення оксидів заліза є ступінь відновлення і ступінь металізації [8]. Ступінь відновлення - це відношення кількості відібраного в процесі відновлення кисню до кількості його у вихідній сировині, що характеризує повноту відновлення. Ступінь металізації - відношення відсоткового вмісту заліза металевого і заліза загального в продукті [9].



Рисунки 2 - Зміна співвідношень оксидів заліза до заліза загального від відсоткового вмісту вугілля марки ДГ у відновнику

Ступінь відновлення огарку при завантаженні вугілля марки ДГ 100% зростає в 1,65 разів, ступінь металізації відповідно в 2,22 разів порівняно зі завантаженням без добавки вугілля марки ДГ до складу відновника.

На процеси твердофазного відновлення крім хімічного складу вихідної сировини великий вплив чинить гранулометричний склад і температурний режим процесу [8].

Зменшення питомої витрати природного газу відбувається за рахунок збільшення частки вугілля марки ДГ у складі відновника. Питома витрата природного газу без використання вугілля марки ДГ за даними комбінату становить 86,5 м<sup>3</sup>/т сухої руди. Середня питома витрата природного газу за період досліджень з використанням вугілля марки ДГ склала 83,090 м<sup>3</sup>/т сухої руди. Економія природного газу за рахунок використання вугілля марки ДГ у складі відновника становить 3,41 м<sup>3</sup>/т сухої руди.

Висновки:

Узагальнено досвід роботи в галузі освоєння та експлуатації технології електроплавки феронікелю та викладено досягнуті показники рудотермічної

печі потужність 40 MWA та особливості процесу технології низького відновлення заліза та вибір оптимального відновника процесу. З урахуванням роботи двох рудотермічних печей, одна з яких працює з високим ступенем відновлення заліза, інша – з низьким ступенем відновлення заліза, досягнуто потенціалу виробництва можливого повного спектру сортів феронікелю, з вмістом нікелю в товарному феронікелі від 18 % до 70 %.

Використання вугілля марки ДГ у складі відновника при обпалюванні нікелевої руди з отриманням огарку позитивно впливає на процес твердофазного відновлення. Найефективнішим для подальшого плавлення огарку в РТП є завантаження шихтових матеріалів з відновником, що містить 75 % вугілля марки ДГ і 25 % вугілля марки антрацитових груп (АС).

Економія природного газу за рахунок використання вугілля марки ДГ у складі відновника становить 3,41 м<sup>3</sup>/т сухої руди або ~4%.

Економія питомої витрати електроенергії на 1 т огарку за рахунок попереднього твердофазного відновлення становить 5 кВт/т огарку або ~1%.

#### Список використаної літератури

1. 2023-2030 Global Ferro Nickel Market is Growing Rapidly with Modern Trend. URL: [2023-2030 Global Ferro Nickel Market is Growing Rapidly with Mod - WICZ](#) (дата звернення: 15.12.2023)

2. Держгеонедра: Україна володіє величезними запасами літію, нікелю, кобальту та марганцю, які необхідні для виробництва акумуляторів для електромобілів (Євросоюз уже зацікавився). URL: [Госгеонедра: Украина располагает огромными запасами лития, никеля, кобальта и марганца, которые необходимы для производства аккумуляторов для электромобилей \(Євросоюз уже заинтересовался\) \(itc.ua\)](#) (дата звернення: 23.12.2022)
3. Maurice Y. Solar, Sina Mostaghel. Smelting of difficult laterite ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2015. Vol. 124. Is.1. P.35-46. <https://doi.org/10.1179/1743285514Y.0000000075>
4. Соколов К.Д. Удосконалення технології конкурентоспроможного феронікелю в умовах ВАТ "ПФК" з використанням сировини зарубіжних родовищ : дис... канд. техн.наук : 05.16.02. Дніпропетровськ, 2012. 181 с.
5. Технологічна інструкція електроплавка огарка у руднотермічних печах № ПФК-УВ-ТІ-14-0002 від 18.02.2022
6. Звіт з переходу на технологію низького відновлення заліза в РТП-1 на Побузькому феронікелевому комбінаті. С.В. Приходько, В.К. Солоха. 2015 р.
7. Технологічна інструкція підготовка шихтових матеріалів та обпалення шихти в обпалювальному цеху ТОВ «ПФК» Код: ПФК-СВ-ТІ-13-0001. Ханусовський Д.
8. Звіт ДП "Державний науково-дослідний та проектний інститут титану" ІТ-13-1/1. М.В. Хазнаферов, А.Д. Сущинський, Ю.В. Поплавський, Н.Ф. Рябчикова. 2013 р.
9. Щитов А.Є., Галімов М.Д., Окунєв О.І. Твердофазне відновлення високкремнистої руди з виділенням металізованого продукту // Дифузія, сорбція і фазові перетворення в процесах відновлення металів: Зб. - М.: Наука, 1981.

#### References

1. 2023-2030 Global Ferro Nickel Market is Growing Rapidly with Modern Trend. URL: [2023-2030 Global Ferro Nickel Market is Growing Rapidly with Mod - WICZ](#)
2. Derzhheonedra: Ukraina volodiie velycheznymy zapasamy litiu, nikeliu, kobaltu ta marhantsiu, yaki neobkhidni dlia vyrobnytstva akumulatoriv dlia elektromobiliv (levrosoiuz uzhe zatsikavyvsia). URL: [Госгеонедра: Украина располагает огромными запасами лития, никеля, кобальта и марганца, которые необходимы для производства аккумуляторов для электромобилей \(Євросоюз уже заинтересовался\) \(itc.ua\)](#)
3. Maurice Y. Solar, Sina Mostaghel. Smelting of difficult laterite ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2015. Vol. 124. Is.1. P.35-46. <https://doi.org/10.1179/1743285514Y.0000000075>
4. Sokolov K.D. Udoskonalennia tekhnolohii konkurentospromozhnoho feronikeliiu v umovakh VAT "PFK" z vykorystanniam syrovyny zarubizhnykh rodovyshch : dys... kand. tekhn.nauk : 05.16.02. Dnipropetrovsk, 2012. 181 s.
5. Tekhnolohichna instruktziia elektroplavka oharka u rudnotermichnykh pechakh № PFK-UUV-TI-14-0002 vid 18.02.2022
6. Zvit z perekhodu na tekhnolohiiu nyzkoho vidnovlennia zaliza v RTP-1 na Pobuzkomu feronikelevomu kombinati. S.V. Prykhodko, V.K. Solokha. 2015 r.
7. Tekhnolohichna instruktziia pidhotovka shykhtovykh materialiv ta obpalennia shykhty v obpaliuvalnomu tsekhu TOV «PFK» Kod: PFK-SV-TI-13-0001. Hanusovskyi D.
8. Zvit DP "Derzhavnyi naukovo-doslidnyi ta proektnyi instytut tytanu" IT-13-1/1. M.V. Khaznaferov, A.D. Sushchynskiy, Yu.V. Poplavskiy, N.F. Riabchikova. 2013 r.
9. Shchytov A.le., Halimov M.D., Okuniev O.I. Tverdofazne vidnovlennia vysokokremnystoi rudy z vydilenniam metalizovanoho produktu // Dyfuziia, sorbtsiia i fazovi peretvorennia v protsesakh vidnovlennia metaliv: Zb. - M.: Nauka, 1981.