DOI https://doi.org/10.32782/geotech2022.35.07
УДК 553.311: 537.621 (477)

Верховцев В.Г., Покалюк В.В., Губіна В.Г., Снісар В.П., Антоненко Т.С., Земсков Г.О.

Верховцев В.Г., доктор геологічних наук, завідувач відділу, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», ORCID: 0000-0002-1015-6725, verkhovtsev@ukr.net
Покалюк В.В., доктор геологічних наук, провідний науковий співробітник, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», ORCID 0000-0002-9282-0246, pvskan@ukr.net
Губіна В.Г., кандидат геолого-мінералогічних наук, провідний науковий співробітник, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», ORCID 0000-0001-7486-5451, gvg131619@gmail.com
Снісар В.П., кандидат геолого-мінералогічних наук, в.о. завідувача відділу, Державна установа «Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка Національної академії наук України»
Антоненко Т.С., кандидат геологічних наук, науковий співробітник, Державна установа «Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка Національної академії наук України»
Земсков Г.О., науковий співробітник, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», ORCID 0000-0002-7445-5329, zemskov-gennadii2020@gmail.com

ЗМІНИ МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАГНЕТИТОВИХ КВАРЦИТІВ ІНГУЛЕЦЬКОГО РОДОВИЩА КРИВБАСУ В ПРОЦЕСІ ЗБАГАЧЕННЯ

Анотація. *Для руд, що підлягають магнітній сепарації, магнітні властивості мінералів і руд є головними, що визначають особливості технологічного процесу збагачення. Зміна магнітних характеристик мінералів і руд унаслідок подрібнення впливає на ефективність флотації, магнітної й електростатичної сепарації, фільтрації та інших технологічних процесів. Вивчення цих змін у процесах переробки корисних копалин є актуальним для вдосконалення раціональних схем та методів переробки і комплексного використання мінеральної сировини. Головна тенденція змін магнітних властивостей корисної копалини (магнетитових кварцитів), яка фіксується нами під час подрібнення і відповідного зменшення розміру зерен мінералів (зокрема, зерен магнетиту), – це поступове зменшення питомої намагніченості насичення, що є наслідком кристалохімічних змін магнетиту в ході технологічного процесу тонкого подрібнення руди. Такі зміни ми відносимо до якісних, бо вони безумовно впливають на результат технологічного процесу – отримання концентрату з максимально можливим вмістом заліза. На етапі мокрого збагачення фіксуються істотні якісні зміни магнітних властивостей як загалом корисної копалини, тобто – поступове зменшення питомої намагніченості насичення вихідної руди під час подрібнення в кульових млинах з подальшим розділенням на магнітний концентрат і немагнітні хвости, так і поступове зменшення питомої намагніченості насичення агрегатів магнетиту в результаті порушення його доменної структури та часткового окиснення з утворенням нових мінеральних фаз – магеміту і гематиту / мартиту. Мінеральні новоутворення – магеміт і гематит / мартит – унаслідок багатостадійної магнітної сепарації потрапляють здебільшого у відходи збагачення, завдяки чому забезпечується можливість отримання концентрату високої якості з максимальним вмістом заліза. Поряд зі змінами намагніченості нами зафіксовано закономірне поступове зменшення температури Кюрі промпродуктів у процесі збагачення магнетитових залізистих кварцитів.*

Ключові слова: *залізисті магнетитові кварцити, магнетит, концентрат, «хвости», магнітні властивості, намагніченість, температура Кюрі.*

Вступ. У процесах первинної переробки та збагачення різних руд металів виникає цілий ряд фізико-хімічних явищ, що можуть суттєво впливати на технологічний процес і якість кінцевих продуктів. Для руд, що підлягають магнітній сепарації, магнітні властивості є головними, вони визначають технологічні особливості процесу збагачення. Зміна магнітних характеристик мінералів під час подрібнення впливає на ефективність флотації, магнітної та електростатичної сепарації, фільтрації, інших технологічних процесів. Тому вивчення змін магнітних властивостей у процесі переробки корисних копалин є актуальним для вдосконалення раціональних схем та методів переробки і комплексного використання мінеральної сировини.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Залежність магнітних властивостей феромагнітних мінералів, зокрема, магнетиту, від розміру частинок, або ступеня подрібнення під час збагачення, відома давно. За даними [1], коерцитивна сила намагнічених частинок магнетиту різко зростає зі зменшенням їх розміру в інтервалі 40–20 мкм; водночас питома магнітна сприйнятливість магнітних частинок розміром до 20 мкм різко зменшується, що обумовлює втрати тонко переподрібненого магнетиту з «хвостами». В класичній роботі з магнетизму гірських порід [5] показано, що зі зменшенням розміру частинок відбувається зменшення питомої магнітної сприйнятливості і збільшення коерцитивної сили. Ці залежності були конкретизовані для

магнетиту із залізистих кварцитів Новокриворізького родовища Кривбасу [8, 9]. Магнітні властивості залізних руд і мінералів Криворізького залізорудного басейну вивчали також Б.І. Пірогов, В.В. Кармазін, В.Д. Доценко, В.Г. Губіна, Г.М. Курочкін та ін. [2–4, 6, 7].

За аналізом літературних даних можна визначити дві причини зниження магнітної сприйнятливості частинок магнетиту під час технологічного циклу переробки руд: 1) у процесі подрібнення магнетиту, зі зменшенням розміру його частинок, порушується первинна доменна структура зерен унаслідок виникнення мікротріщин, зсувних та пластичних мікродислокацій і мікродеформацій, чим й обумовлені зменшення намагніченості та зростання коерцитивної сили; 2) у разі тонкого подрібнення магнетиту унаслідок механічного тертя та кісневмісних умов середовища відбувається його часткове окиснення і поява новоутворених фаз оксидів заліза – магеміту та гематиту / мартиту, які мають значно менші параметри магнітної сприйнятливості ніж магнетит; суміш магнетиту з новоутвореними більш окисненими фазами заліза обумовлює зниження магнітної сприйнятливості.

Мета дослідження – дослідити характер змін магнітних властивостей вихідної руди родовища Інгулецьке, проміжних і кінцевих продуктів на різних стадіях технологічного циклу збагачення на Інгулецькому гірничо-збагачувальному комбінаті (ІнГЗК).

Методи дослідження. Виконано вимірювання питомої намагніченості насичення та температури Кюрі вихідних, проміжних і кінцевих продуктів збагачення залізистих магнетитових кварцитів на ІнГЗК. Вимірювання намагніченості здійснено за допомогою «Пристрою для експресного вимірювання намагніченості руд та магнітних матеріалів», сконструйованого й виготовленого в Інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України [10], який представляє собою силовимірювальний блок (електронні ваги) з нерухомо закріпленим постійним магнітом Nd–Fe–B (ціна поділки – 0,0001 г, відтворюваність ± 0,0001 г, межа зважування – до 210 г, вага наважки в наших дослідженнях – 200 мг). Термомагнітні виміри з визначенням температури Кюрі виконано за допомогою «Пристрою для визначення температури Кюрі та ідентифікації магнітних мінералів в рудах та магнітних матеріалах», сконструйованого й виготовленого в Інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України [11].

Table 1. Results of measurements of the specific saturation magnetization of initial, intermediate and final products of technological enrichment of ferrous magnetite quartzite from quarry, technical laboratory and ore-processing plants RZF-1 and RZF-2

№	Sample number	Place of selection	Characteristics of the material	The specific saturation magnetization, A × m² / kg	Curie temperature on the cooling curve, ºC
Quarry					
1	К-8	Ingulets quarry	Ore flow on RZF-1	38.73	562
2	К-9		Ore flow on RZF-2	49.94	569
Technological laboratory					
3	И-1	Ore flow on RZF-1	Drain of mill stage I	36.36	
4	И-2		Magnetic product of stage I	66.29	567
5	И-3		Tailings of stade I	0.84	
6	И-6	Ore flow on RZF-2	Drain of mill stage I	47.9	
7	И-7		Magnetic product of stage I	64.67	571
8	И-8		Tailings of stade I	1.19	
9	И-11		Magnetic product of stage III	79.57	553
RZF-1 plant					
10	Р-2	RZF-1	Drain of classifiers	34.75	562
11	Р-3		Magnetic product of stage I	59.41	563
12	Р-4		Tailings of stade I	2.06	565
13	Р-9		Magnetic product of stage IV	76.89	560
14	Р-10		Tailings of stade IV	1.97	542
RZF-2 plant					
15	Р-15	RZF-2	Drain of classifiers	38.04	564
16	Р-16		Magnetic product of stage I	63.9	565
17	Р-17		Tailings of stade I	3.99	569
18	Р-20		Magnetic product of stage III	75.77	558
19	Р-21		Tailings of stade III	4.97	566
Samples ground in an agate mortar for 1 minute					
20	И-2/п	Ore flow on RZF-1	Magnetic product of stage I	63.21	552
21	И-7/п	Ore flow on RZF-2	Magnetic product of stage I	60.97	562
22	И-11/п		Magnetic product of stage III	76.45	547

Table 2. Comparison of the results of measurements of the specific saturation magnetization and Curie temperature of samples of magnetic product RZF-1 and RZF-2 of different stages of magnetic separation, before and after experimental dry grinding in agate mortar for 1 minute

		The specific saturation magnetization, A × m² / kg			**Curie temperature, °C, by cooling curves**		
Samples	Place of selection and characteristics of the material	Magnetic product	Magnetic product after fine grinding in agate mortar for 1 minute	Relative difference A × m² / kg (%)	Magnetic product	Magnetic product after fine grinding in agate mortar for 1 minute	Relative difference A × m² / kg (%)
И-2	RZF-1, magnetic product of stage I, technological laboratory	66.29	63.21	–3.08 (–4.6%)	567	552	–15 –2.6%
И-7	RZF-2, magnetic product of stage I, technological laboratory	64.67	60.97	–3.7 (–5.7%)	571	562	–9 –1.6%
И-11	RZF-2, magnetic product of stage III, technological laboratory	79.57	76.45	–3.12 (–3.9%)	553	547	–6 –1.1%

Виклад основного матеріалу досліджень. Були досліджені: вихідна руда, що спрямовується на рудозбагачувальні фабрики РЗФ-1 і РЗФ-2, проміжні та кінцеві продукти збагачення магнетитових залізистих кварцитів, а також промпродукти, отримані під час технологічного експерименту в технологічній лабораторії комбінату.

Результати вимірювань наведено в табл. 1, 2, і на рис. 1, 2.

Результати вимірів намагніченості. За даними табл. 1, значення питомої намагніченості насичення вихідної руди є більшими для рудопотоку на РЗФ-2 (49,94 А×м²/кг), ніж для рудопотоку на РЗФ-1 (38,73 А×м²/кг). Це свідчить, що на РЗФ-2 збагачувалась багатіша руда, ніж на РЗФ-1. Питома намагніченість насичення магнітного продукту кінцевих третьої і четвертої стадій для обох РЗФ приблизно однакова (76,89–75,77 А×м²/кг). Слід відмітити добру відповідність значень намагніченості продуктів, отриманих під час технологічного експерименту в технологічній лабораторії і продуктів збагачення на рудозбагачувальних фабриках.

Важливо, що вже на початковій стадії збагачення на РЗФ, ще до початку магнітної сепарації (від вихідних рудопотоків на РЗФ-1 і РЗФ-2 до зливів класифікаторів РЗФ-1 і РЗФ-2) спостерігається суттєве зменшення параметрів питомої намагніченості насичення вихідної руди – на 3,98–11,9 А×м²/кг**,** тобто на 6,2–23,8 % від вихідних значень (рис. 1). Далі, починаючи з I стадії магнітної сепарації, відбувається кардинальна зміна магнітних властивостей продуктів у зв'язку з їх розділенням на магнітний продукт і майже немагнітні хвости. У кінцевих концентратах питома намагніченість насичення збільшується майже удвічі та знижується у кінцевих хвостах – у 20–30 разів.

Додатково ми виміряли питому намагніченість насичення проб магнітних продуктів I и III стадій магнітної сепарації, отриманих у технологічній лабораторії (проби И-2, И-7, И-11) і цих же проб, перетертих в агатовій ступці протягом 1 хвилини – для фіксації змін магнітних властивостей саме для магнетитового концентрату впродовж конкретних стадій. Дані табл. 2 та рис. 1 засвідчують, що питома намагніченість насичення перетертих проб стабільно статистично достовірно зменшена приблизно на 5 % (3,9–5,7 %) по відношенню до вихідної проби магнітного продукту (концентрату). Враховуючи те, що вихідна проба концентрату складена, переважно, магнетитом, можна вважати, що це зменшення реалізується саме для агрегатів зерен магнетиту, в процесі його тонкого подрібнення / помелу. Цілком очевидно, цей змодельований процес тонкого помелу концентрату в агатовій ступці, якоюсь мірою, відображає подібний процес, який відбувається на РЗФ під час багатостадійного тонкого подрібнення зерен магнетиту. Він може свідчити, що на РЗФ відбувається не тільки магнітне розділення мінералів, а й паралельне доподрібнення саме зерен магнетиту. У ході доподрібнення намагніченість насичення агрегатів зерен магнетиту продовжує зменшуватись.

Водночас питома намагніченість насичення «хвостів» трохи збільшується (з 0,8 до 2–5 А×м²/кг) від «хвостів» I стадії до «хвостів» III–IV стадій. Це може бути спричинено тим, що в кінцевих «хвостах» загальна частка заліза збільшується за рахунок збільшення кількості тонкодисперсної фракції магнетиту.

Таким чином, головна тенденція змін намагніченості корисної копалини (магнетитових кварцитів), зафіксована нами під час подрібнення і відповідного зменшення розміру зерен мінералів (зокрема, зерен магнетиту) – це поступове зменшення питомої намагніченості насичення, що є наслідком кристалохімічних змін магнетиту в ході технологічного процесу збагачення руди. Такі зміни, згідно з опублікованими даними [6, 7], відбуваються внаслідок порушення доменної

структури та часткового окиснення магнетиту з утворенням нових мінеральних фаз – магеміту та гематиту / мартиту, які мають суттєво нижчі значення намагніченості насичення в порівнянні з магнетитом.

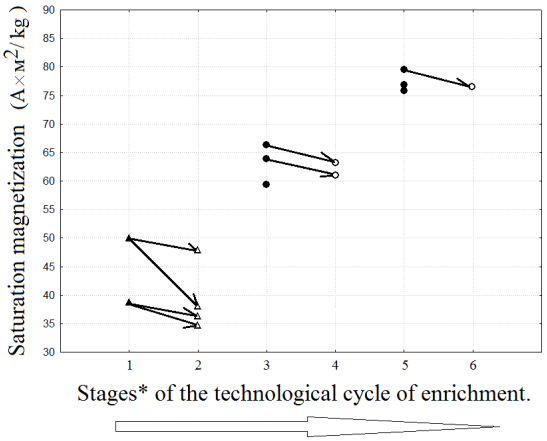


Fig. 1. Changes in the specific saturation magnetization of the iron-magnetite quartzite at different stages* of the technological cycle of enrichment. Stages*: 1 – ore flows at RZF-1 and RZF-2; 2 – drain of the classifier; 3 – magnetic product of stage I; 4 – magnetic product of stage I with regrinding; 5 – magnetic product (concentrate) of stage III–IV; 6 – magnetic product of stage III–IV with regrinding. Stages* – some stages of the technological process from which samples were taken for research

Результати термомагнітних досліджень. Як відомо, магнетит Fe_3O_4 – феромагнітний матеріал, що містить іони Fe^{2+} і Fe^{3+}. В окисних умовах магнетит нестійкий і зазнає однофазного окиснення з утворенням катіон-дефіцитного магнетиту аж до магеміту. Магеміт γ-Fe_2O_3 ізоструктурний магнетиту, але має менший розмір комірки і більшу щільність упаковки. Він також є феромагнетиком. Магеміт – нестійкий до нагрівання і необоротно трансформується в гематит у діапазоні значень температури 300–500 ºС. Гематит α-Fe_2O_3 – антиферомагнітний оксид, характеризується винятково високою стабільністю, тож часто стає кінцевим етапом трансформації інших оксидів заліза.

Температура Кюрі для чистого магнетиту складає 578–580 ºС. Температура Кюрі досліджених нами проб вихідної руди, яка спрямовується на РЗФ-1 і РЗФ-2, та концентратів різних стадій (за кривими охолодження) коливається в межах 553–571 ºС, тобто є значно меншою, ніж для чистого магнетиту. Це ми пояснюємо тим, що магнетит вихідної руди і концентратів є кристалохімічно не чистим або зміненим і вміщує деяку частку немагнітних або слабомагнітних фаз оксидів заліза.

Порівняння температури Кюрі досліджених проб у послідовності технологічного циклу, вказує на певну закономірну, досить чітко проявлену тенденцію зменшення температури Кюрі з наростанням ступеня подрібнення (рис. 2).

Так, температура Кюрі для вихідної руди, яка поступає на РЗФ-1 і РЗФ-2 (проби К-8, К-9), складає 562–569 ºС; для зливу класифікатора (проби Р-2, Р-15) – 562–564 ºС, тобто на цій стадії спостерігається слабка тенденція до зменшення температури Кюрі (в середньому від 565,5 до 563 ºС, приблизно на 0,4 %). Істотніше зменшується температура Кюрі на подальших стадіях – від магнітних продуктів I стадії до магнітних продуктів / концентратів III–IV стадій: таке зменшення складає, в середньому, від 566,5 до 557 ºС, тобто зменшується на 1,7 %. Після доподрібнення, на кожній стадії магнітної сепарації, відбувається зменшення значень температури Кюрі приблизно на 1,5 % (табл. 1; рис. 2). Загальне зменшення температури Кюрі в процесі тонкого подрібнення / перетирання корисної копалини на РЗФ-1 і РЗФ-2 становить приблизно від 568 до 550 ºС (рис. 2), тобто зменшується майже на 20 ºС, що складає ~ 2,8 % від початкових значень. Таке зменшення може бути обумовлено частковим окисненням магнетиту і перетворенням його на гематит / мартит.

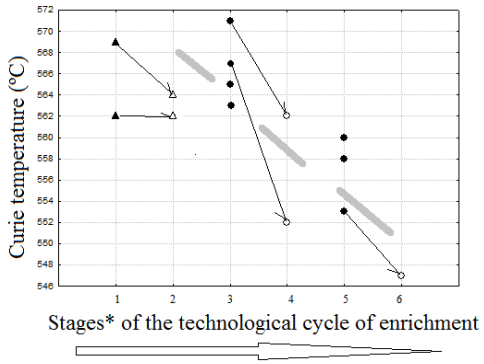


Fig. 2. Curie temperature (ºC) changes of the iron-magnetite quartzite in the technological cycle of enrichment. Stages *: 1 – ore flows at RZF-1 and RZF-2; 2 – drain of the classifier; 3 – magnetic product of stage I; 4 – magnetic product of stage I with regrinding; 5 – magnetic product (concentrate) of stage III–IV; 6 – magnetic product of stage III–IV with regrinding. A thick gray dashed line shows the general trend of decreasing Curie temperature. Stages* – some stages of the technological process from which samples were taken for thermomagnetic research

Висновки. Виконані дослідження дають змогу сформулювати такі висновки.

1. На етапі мокрого збагачення відбуваються істотні якісні зміни магнітних властивостей, як загалом корисної копалини – поступове зменшення питомої намагніченості насичення вихідної руди під час подрібнення в кульових млинах, з подальшим розділенням на магнітний концентрат і немагнітні хвости, так і поступове зменшення питомої намагніченості насичення агрегатів магнетиту в результаті порушення його доменної структури та часткового окиснення з утворенням нових мінеральних фаз – магеміту і гематиту / мартиту. Мінеральні новоутворення – магеміт і гематит / мартит – внаслідок багатостадійної магнітної сепарації, здебільшого, потрапляють у відходи збагачення, завдяки чому забезпечується можливість отримання концентрату високої якості з максимальним вмістом заліза.

2. Поряд зі змінами намагніченості нами отримано нові дані щодо закономірного поступового зменшення температури Кюрі промпродуктів у процесі мокрого тонкого подрібнення / перетирання корисної копалини на РЗФ-1 і РЗФ-2, яке зменшується приблизно на 2,8 % від вихідних значень для рудопотоків, що може свідчити про новоутворення гематиту.

3. Отримані дані можуть бути використані для коригування режимів подрібнення та магнітної сепарації в технологічному циклі збагачення залізистих магнетитових кварцитів.

References

1. Dean, R. S. and Davis, C. W. (1941), Magnetic Separation of Ores. *U. S. Dept. of Interior. Bureau of mines. Bull. 425*. Washington, 417 p.
2. Dotsenko, V.D., Vorobyov, A.N., Radchuk, A.G. (2013), Handbook on the physical and mechanical properties of ferruginous quartzites, products of their processing and other fine-grained materials. Dionysus: Krivoy Rog, 296 p.
3. Gubina, V.G., Kurochkin, G.M., Gubin, G.G., Korolenko, M.K. (2020), Magnetic properties of weakly magnetic minerals of iron quartzites of Kryvyi Rih basin, *Geochemistry of technogenesis*, Iss. 4: 58-64.
4. Karmazin, V.V., Karmazin,V.I. (1988), Magnetic and electrical methods of enrichment. Moscow, 304 p.
5. Nagata, T. (1956), Magnetism of rocks (translated from English). M., 226 p.
6. Pirogov, B.I. (1989), Ferro-siliceous formations of the Precambrian of the European part of the USSR. Mineralogy. Kyiv: Naukova dumka, 168 p.
7. Pirogov, B.I., Porotov, G.S., Kholoshin, I.V., Tarasenko, V.N. (1988), Technological mineralogy of iron ores. Leningrad: Nauka, 304 p.
8. Shvets, I.N. (1962), Dependence of the magnetic properties of powdered magnetite on grain size, *Zapiski Ukr. Otdela Vsesoyuz. Miner. Ob-va. AN USSR*, 140-145.
9. Shvets, I.N. (1963), Magnetic properties of ores of processing plants of Krivoy Rog, *Sb. nauchnykh trudov Krivorozhskogo gornorudnogo in-ta*, Iss. XVII, 201-208.
10. Utility model patent UA 94163 U. (2014), Device for express measurement of magnetization of ores and magnetic materials, *State Intellectual Property Service of Ukrain*, Bul. No. 20.
11. Utility model patent UA 94514 U. (2014), Device for determining the Curie temperature and identification of magnetic minerals in ores and magnetic materials, *State Intellectual Property Service of Ukrain*, Bul. No. 21.

CHANGES IN THE MAGNETIC PROPERTIES OF MAGNETITE QUARTZITE OF THE INGULETSK DEPOSIT OF KRYVYI RIH BASIN IN THE ENRICHMENT PROCESS

V. Verkhovtsev, V. Pokalyuk, V. Gubina, V. Snisar, T. Antonenko, G. Zemskov

Verkhovtsev V.G., D. Sc. (Geol.), Head of Department, State Institution «The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0002-1015-6725, verkhovtsev@ukr.net
Pokalyuk V.V., D. Sc. (Geol.), Leading Researcher, State Institution «The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0002-9282-0246,
Gubina V.G., PhD (Geol.), Leading Researcher, State Institution «The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine», ORCID**:** 0000-0001-7486-5451, gvg131619@gmail.com
Snisar V.P., PhD (Geol.&Min.), Head of the Department, State Institution «Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation named after M.P. Semenenko of the National Academy of Sciences of Ukraine»
Antonenko T.S., PhD (Geol.), State Institution "Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation named after M.P. Semenenko of the National Academy of Sciences of Ukraine"
Zemskov G.O., Researcher, State Institution «Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukrain», ORCID 0000-0002-7445-5329, zemskov-gennadii2020@gmail.com

Abstract. *For ores subject to magnetic separation, the magnetic properties of minerals and ores are the main determinants of the technological process of enrichment. Changes in the magnetic characteristics of minerals and ores during grinding affect the efficiency of flotation, magnetic and electrostatic separation, filtration and other technological processes. The study of these changes in the processes of mineral processing is relevant for the improvement of rational schemes and methods of processing and integrated use of mineral resources. The main trend of changes in the magnetic properties of magnetite quartzites, which we record during grinding and a corresponding reduction of the grain size of minerals, is a gradual decrease in specific saturation magnetization due to crystal chemical changes. We refer to such changes as qualitative, because they definitely affect the result of the technological process - obtaining a concentrate with the maximum possible iron content. At the stage of wet beneficiation, significant qualitative changes in the magnetic properties take place: 1) a gradual decrease in the magnetization of the source ore during grinding in ball mills with subsequent separation into magnetic concentrate and nonmagnetic tails;2) the gradual decrease in the magnetization of magnetite aggregates as a result of disruption of its domain structure and partial oxidation with the formation of new mineral phases - magemite and hematite / martite. Due to multi-stage magnetic separation, mineral neoplasms - magemite and hematite / martite, as a rule get into the enrichment waste, which provides the opportunity to obtain a high-quality concentrate with maximum iron content. Along with the changes in magnetization, we recorded a natural gradual decrease in the Curie temperature of industrial products in the process of enrichment of ferrous quartzites.*

Key words: *ferruginous magnetite quartzites, magnetite, concentrate, «tails», magnetic properties, magnetization, Curie temperature.*