

- Кныш Г.М. Маркшейдерское дело. – М.: Недра, 1985.
6. Борщ-Компониц В.И. Геодезия. Маркшейдерское дело. – М.: Недра, 1989.
 7. Воловецкий Б. Оцінка впливу економічних параметрів на точність геодезичних вимірювань при кадастрових роботах. // Geodezja inzynieryjna i katastr w gospodarce narodowej. – Lvov-Rzeszow. – 1998. – С. 19-22.
 8. Загредінов Р.В. Планування супутникових геодезичних вимірів: Навчально-методичний посібник. – К.: К(П)ФУ, 2013.
 9. Инструкция по производству маркшейдерских работ. – М.: Недра, 1987. – 189 с.
 10. Лебедев Н.Н. Курс инженерной геодезии. – М.: Недра, 1974.
 11. Левчук Г.П., Новак В.Е., Лебедев Н.Н. Прикладная геодезия. – М.: Недра, 1983.
 12. Манукян Л.В. Создание модели квазигеоида и сети постоянно действующих базовых станций в республике Армения / Л.В. Манукян, В.А. Маркарян // Инженерная геодезия. – 2014. – Вып. 60. – С. 34–39.
 13. Попов В.М., Букринський В.А. Геодезія та маркшейдерія. – М.: Московський державний гірничий Університет, 2007.
 14. Перегудов М.А., Пацев І.І., Борщ-Компониц В.І. Маркшейдерські роботи на кар'єрах та копальнях. – М.: Недра, 1980.
 15. Сидоренко В.Д., Федоренко П.Й., Шолох М.В., Переметчик А.В. Геодезія і маркшейдерія. – Кривий Ріг: Видавничий центр КТУ, 2008. – 437 с.
 16. Ушаков И.Н., Казаковский Д.А., Кротов Г.А., Лавров В.Н. и др. Маркшейдерское дело. – М., Недра, 1989.
 17. Jahn C.H. Das SAPOS®-Qualitätskontrollleder Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland / C.H. Jahn, J. Rubach, C. Elsner, A. Schenk, P. Wagenfuhr, H.-G. Dick, A. Brunner // zfv, 3/2011. – S. 127–137.

УДК 622.27: 621.926.9

М.І. СОКУР, д-р техн. наук, проф.,
Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського
В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.,
Харківський національний університет «Харківський політехнічний інститут»

ВИПРОБУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОМБІНОВАНОГО ПОДРІБНЕННЯ НА ІНГУЛЕЦЬКОМУ ГЗК

Мета. Удосконалення конструкції і схемних рішень комбінованого подрібнення магнетитових руд в умовах Інгулецького ГЗК. Уведення в науковий обіг результатів промислового випробування в умовах Інгулецького ГЗК нової технології комбінованого подрібнення магнетитової руди.

Методика. Науковий експеримент. Промислове випробування модернізованої технологічної схеми і устаткування секції № 18 Інгулецького ГЗК, зокрема: підвищена установлена потужність електродвигунів з 1600 до 2000 кВт (для можливості довантаження куль у млин) реконструйовані головні приводи двох млинів ММС - 7000×2300; розроблені, виготовлені і встановлені на млинах ММС - 7000×2300 класифікуючі бутари поворотного типу з регульованим виводом гальки; млини ММС - 7000×2300 оснащені новою конструкцією футеровки, що дозволило довантажувати у млин кулі; на млинах ММС - 7000×2300 встановлені розвантажувальні грати з щілиновидними отворами шириною 15 мм, розташованими в периферійній частині; на II і III стадії подрібнення використані нові універсальні млини МШЦ - 4000×7500; у II прийомі знешламлювання застосований дешламатор МД - 9; на млинах ММС - 7000×2300 для проведення випробувань використані барабани з литими торцевими стінками.

Результати. В умовах Інгулецького ГЗК виконане промислове випробування нової технології комбінованого подрібнення магнетитової руди.

Практична значимість. Застосування нової комбінованої технології подрібнення підвищує продуктивність секції на 30,6 т/год. Масова частка заліза в концентраті склала 62,8%, що на 0,3% більше, ніж в раніше випробуваній комбінованій технології подрібнення.

Наукова новизна. Суть технології полягає в додаванні фіксованої кількості металевих куль у млини самоподрібнення ММС - 7000×2300 (I стадія подрібнення). Це забезпечило комбінований механізм руйнування грудок рудної сировини – як помельними тілами, так і крупними шматками руди. На II і III стадії подрібнення застосовуються кульові млини.

Ключові слова: млини самоподрібнення, комбінована технологія подрібнення, Інгулецький ГЗК, промислове випробування.

doi:10.31721/2306-5435-2022-1-110-98-102

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. З поглибленням кар'єра Інгuleцького родовища магнетитових руд погіршуються фізико-механічні властивості сировини, що добувається. Це обумовлює зниження ефективності технологічного процесу самоподрібнення, застосовуваного на збагачувальній фабриці (другій черзі) Інгuleцького ГЗК. Одним зі шляхів підвищення ефективності збагачення магнетитових руд є застосування напівсамоподрібнення і комбінованих схем подрібнення.

Технологічна схема самоподрібнення секції № 17 Інгuleцького ГЗК включає три стадії самоподрібнення (самоподрібнення в I стадії і рудногалькове в II і III стадіях), три стадії магнітного збагачення і два етапи знешламлювання.

Перший етап промислових випробувань комбінованої схеми подрібнення з використанням в I стадії млина самоподрібнення ММС-7000×2300 в заводському виконанні показав можливість збільшення продуктивності секції на 18,5% в порівнянні з секцією повного самоподрібнення при одночасному зниженні масової частки заліза в концентраті на 1%.

Погіршення якості концентрату було наслідком нетехнологічності випробуваної схеми комбінованого подрібнення, по якій в другій стадії подрібнення в млині МШР-4000×7500 подрібнювалися і галька, що виводиться з млинів ММС-7000×2300 галька величиною -50+20 мм і промпродукт I стадії магнітного збагачення величиною -1+0 мм.

Для підвищення вмісту заліза у концентраті постала проблема вдосконалення конструкції обладнання і схемних рішень подрібнювальних операцій.

Аналіз досліджень і публікацій. У роботах [1-9] висвітлені різні аспекти роботи млинів самоподрібнення і напівсамоподрібнення, зокрема пошук раціональної конструкції їх елементів, моделювання процесу подрібнення, знос футеровки тощо.

Зокрема, в роботі [1] описані інноваційні технічні рішення успішно впроваджені на млинах МБ-90-30, ММС-70-23, ММС-90-30А, ММС-105-50 і рекомендовані до використання при роботі млинів інших типорозмірів. На підставі результатів досліджень була створена і реалізована в промислових умовах конструкція барабана млина з ребрами жорсткості з додатковими полицями на вільних кінцях таврового перерізу.

У роботі [2] встановлено, що в барабані млина зварної конструкції виникають значні залишкові напруження що досягають небезпечних значень в зварних швах ребер жорсткості, а також в місці приварювання торцевої стінки завтовшки 56 мм до кільцевого фланця завтовшки 205 мм; тому ці перерізи є небезпечними концентраторами напруження. Зроблено висновок, що найбільш прийнятна конструкція барабана, в якому несущими основне навантаження елементами (разом із стінкою) є ребра змінної товщини, що збільшується у напрямі до цапфи.

У роботі [3] за допомогою програмного ресурсу SolidWorks виконано моделювання напруженого стану барабану, зокрема, його стінок в холостому режимі та при номінальному навантаженні. Одержані параметричні поля та епюри напружень корелюють з експериментальними даними, одержаними при фізичному моделюванні. Незалежно від конфігурації профілю стінки барабана (прямокутна чи трапецевидна) спостерігається чітке зростання напружень в районі цапфи. При цьому трапецевидна форма стінки барабана млина з потовщенням в області цапфи забезпечує зменшення напружень в 1,7 рази. Встановлено, що зона максимальних напружень при номінальному навантаженні кількісно оцінюється 72-82,5 МПа.

У роботах [4-9] виконані дослідження абразивного зношування шару футеровки в млині напівсамоподрібнення, механізму руйнування руди в млині самоподрібнення. Запропоновані авторські моделі млинів само подрібнення і напівсамоподрібнення а також способи підвищення продуктивності млинів за рахунок модифікації зносостійких сталевих компонентів.

Постановка завдання. Удосконалення конструкції і схемних рішень комбінованого подрібнення магнетитових руд в умовах Інгuleцького ГЗК.

За наслідками випробувань секцій №18 встановити масову частку заліза в концентраті, масові частки заліза в хвостах за новою комбінованою технологією подрібнення секції №18 і тристадійного самоподрібнення (секція 17). Оцінити вплив застосування нової комбінованої технології подрібнення на продуктивність секції.

Викладення матеріалу та результати. Для поліпшення якісних показників концентрату рудо-збагачувальної фабрики РЗФ-2 Інгuleцького ГЗК проведені випробування нової комбінованої схеми подрібнення з модернізованим устаткуванням і напівсамоподрібненням в I стадії

подрібнення. Для цих цілей здійснена реконструкція і модернізація технологічної схеми і устаткування секції № 18 в наступних напрямках:

для підвищення установленної потужності електродвигунів з 1600 до 2000 кВт (для можливості довантаження куль в млин) реконструйовані головні приводи двох млинів ММС-7000×2300;

розроблені, виготовлені і встановлені на млинах ММС-7000×2300 класифікуючі бутари поворотного типу з регульованим виводом гальки;

млини ММС-7000×2300 оснащені новою конструкцією футеровки, що дозволило довантажувати в млин кулі;

на млинах ММС-7000×2300 встановлені розвантажувальні ґрати з щілиновидними отворами шириною 15 мм, розташованими в периферійній частині;

на II і III стадії подрібнення використані нові універсальні млини МШЦ-4000×7500;

у II прийомі знешламлювання застосований дешламатор МД-9.

На базі виконаних тензометричних досліджень млина ММС-7000×2300 для проведення випробувань використані барабани з литими торцевими стінками.

Технологічна схема збагачення з комбінованим подрібненням секції № 18 включала три стадії подрібнення (напівсамоподрібнення в I стадії і кульового в II і III стадіях) і класифікацію.

Млини ММС-7000×2300 I стадії напівсамоподрібнення працювали при добавці куль діаметром 125 і 60 мм до 10-15 мас.% від рудного завантаження в замкнутому циклі з односпіральною класифікаторами.

Класифікація в II стадії подрібнення здійснювалася в два прийоми і включала попередню і контрольну класифікації промпродуктів магнітного збагачення. Подрібнення II і III стадій здійснювалося в млинах МШЦ-4000×7500.

Особливістю комбінованої схеми подрібнення було усунення операції виведення гальки з млина I стадії подрібнення.

За період випробувань на секції № 17 і 18 надходила руда практично однакового складу, представлена силікат-магнетитовими залістими кварцитами.

Млин самоподрібнення ММС-7000×2300 для роботи в режимі напівсамоподрібнення був обладнаний спеціальним футеруванням проточної частини барабана і розвантажувальними ґратами з щілиними отворами в її периферійній частині шириною 15 мм. Вихідна руда подавалася на подушку (шар) руди, що зменшувало знос футеровки. На стику циліндрової частини барабана з торцевою кришкою і розвантажувальними ґратами, а також на ґратах спостерігалася зависання куль. Розмір щілинних отворів розвантажувальних ґрат через їх завальцьовки практично не змінився і в середньому склав 17 мм.

Первинна маса кульового завантаження млина ММС-7000×2300 складала 40 т і включала кулі діаметром 125 і 60 мм. Через недостатню продуктивність і накопичення в млині куль малого діаметру надалі застосовувалися тільки кулі діаметром 125 мм. Аналогічна закономірність підтверджується практикою роботи зарубіжних фабрик [10].

Випробування проводилися при різних кульових завантаженнях. Аналіз впливу кульових завантажень на продуктивність млинів ММС-7000×2300 показує, що при довантаженні 48 т куль в кожен млин продуктивність секції по руді складає 193,5 т/год (100,8 т/год. млини №181 і 92,7 т/год. № 183). При завантаженні 10-15 мас.% куль (відповідає масі 35-53 т) продуктивність млина само подрібнення, що працює без виведення гальки, підвищується на 30-90%. У той же час, продуктивність секції з повним рудним самоподрібненням і виведенням гальки склала 162,9 т/год.

Випробування показали, що на процес самоподрібнення істотно впливає гранулометричний склад вихідної руди. Із зменшенням масової частки класу +75 мм продуктивність млина зростає. Максимальна масова частка класу +75 мм у вихідній руді не повинна перевищувати 40%.

Одним з основних параметрів, що визначають технологічні показники роботи барабаних млинів, є ступінь заповнення їх подрібнювальним середовищем. Відомо, що загальне заповнення млинів напівсамоподрібнення кулями і крупно-грудковими фракціями руди не повинно перевищувати 30-35% об'єму барабана млина. При випробуваннях на Інгулецькому ГЗК, встановлено, що найбільша ефективність напівсамоподрібнення досягається при загальному ступені заповнення барабана млина (кулі+руда) рівного 30-35%.

При масовій частці 50,1% класу - 0,05 мм в зливах класифікаторів питома продуктивність млинів напівсамоподрібнення складала 0,605 т (віднесено до об'єму барабана - м³/год). Питома продуктивність млинів ММС-7000×2300, що працюють в режимі самоподрібнення, 0,58 т (м³/год) при масовій частці 62% класу -0,05 мм.

Питома витрата енергії в I стадії комбінованого подрібнення відповідно складала 15,7 і 16,5 кВт на 1 т початкової руди. Питома витрата куль діаметром 125 мм складала 1,1 кг на 1 т руди. Додавання куль в млин ММС-7000×2300 сприяє зниженню питомої витрати енергії і підвищенню питомої продуктивності по вихідній руді і по готовому класу -0,074 мм.

Подрібнення у II і III стадій здійснюється в млинах МШЦ-4000×7500. Як подрібнювальне середовище використовувалися параболоїди. На період випробувань млини заповнювалися помельними тілами на 32-35% об'єму, при цьому споживана двигуном потужність складала 1650-1700 кВт. Величина подрібнення по класу - 0,05 мм для II і III стадій складала відповідно 86,1 і 95,3%, питома продуктивність - 0,73 і 0,1 т (м³/год), питома витрата помельних тіл на 1 т вихідної руди - 0,61 і 0,41 кг.

Млин МШР-4000×7600, працюючи в режимі рудногалежного подрібнення, споживає 1200-1250 кВт енергії.

За наслідками випробувань секції №18 масова частка заліза в концентраті складала 65,8%, що на 0,3% більше, ніж в раніше випробуваній комбінованій схемі подрібнення секції №17.

Масова частка заліза в хвостах за комбінованою схемою подрібнення секції №18 і тристадійного самоподрібнення (секція 17) відповідно складала 14,7 і 14,52%. Застосування комбінованої схеми подрібнення підвищує продуктивність секції на 30,6 т/год.

Випробування показали, що комбінована схема подрібнення дозволила підвищити надійність роботи всієї технологічної схеми за рахунок виключення з схеми конвеєрної подачі гальки і скрапу в млин МРГ-7000×2300 і МРГ-4000×7500.

Висновки та напрямок подальшого дослідження:

1. В умовах Інгулецького ГЗК випробувана технологія комбінованого подрібнення, суть якої полягає в додаванні помельних тіл у млини самоподрібнення ММС-7000×2300. Це забезпечило комбінований механізм руйнування грудок рудної сировини - як помельними тілами, так і крупними шматками руди.

2. За наслідками випробувань секції №18 масова частка заліза в концентраті складала 65,8%, що на 0,3% більше, ніж в раніше випробуваній комбінованій схемі подрібнення.

3. Масові частки заліза в хвостах за новою комбінованою технологією подрібнення секції №18 і тристадійного самоподрібнення (секція 17) суттєво не відрізняються - 14,7% і 14,52%.

4. Застосування нової комбінованої технології подрібнення підвищує продуктивність секції на 30,6 т/год.

Список літератури

1. **Сокур М. І.** Дослідження інноваційної конструкції корпусів млинів самоподрібнення / **Сокур М. І., Білецький В. С., Божик Д. П.** // Збагачення корисних копалин, 2017. – Вип. 68 (109). – С. 82–91.
2. **Сокур М. І.** Експериментальні дослідження напруженого стану барабану млина самоподрібнення в промислових умовах / **М. І. Сокур, В. С. Білецький, Д. П. Божик** // Збагачення корисних копалин. 2017. – Вип. 68 (109). – С. 55–64.
3. Моделювання напруженого стану барабана млина самоподрібнення / **М. І. Сокур, В. С. Білецький, Д. П. Божик, І. М. Сокур** // *Качество минерального сырья*, 2018. – Т. 2. - С. 251-263.
4. The study of the lining layer abrading wear in the semi-autogenous grinding mill / **Mykola Sokur, Volodymyr Biletskyi, Mykhailo Fyk, Oleksandr Fyk and Igor Zaselskiy** / E3S Web Conf. Volume 166, 2020. The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020). Article Number 03008. Pages 7. Section Sustainable Mining/ <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016603008> Published online 22 April 2020.
5. **G. G. Stanley.** (1974) Mechanisms in the autogenous mill and their mathematical representation // *Journal of the south african institute of mining and metallurgy.* № 75. P. 7798.
6. **S. Morrell.** A new autogenous and semi-autogenous mill model for scale-up, design and optimization. March 2004. *Minerals Engineering* 17(3):437-445. DOI:10.1016/j.mineng.2003.10.013
7. **M.Yahyaei, S.Banisi, M.Hadizadeh.** Modification of SAG mill liner shape based on 3-D liner wear profile measurements // *International Journal of Mineral Processing* Volume 91, Issues 3-4, 16 May 2009, Pages 111–115. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.02.002>
8. **Paul Toor** e.a. (2015) Understanding the effects of liner wear on SAG mill performance // **Paul Toor, Malcolm S. Powell, Marko Hilden, Nirmal S. Weerasekara** / Conference: MetPlant, 2015. Perth, Australia.
9. **W.C.Dailey.** (1985) Wet Semi-Autogenous Grinding Mills //SME-AIME Fall Meeting, Albuquerque, New Mexico. October 16-18, 1985. Society of mining engineers. Preprint № 85-405. <https://www.911metallurgist.com/wet-semi-autogenous-grinding-mills/>
10. Mills productivity improved by modifying wear-resistant steel components. // *Weet. Miner.*, 1976, 49, №.7.