

МЛИНИ І ТЕХНОЛОГІЯ ПРИМУСОВОГО ПОДРІБНЮВАННЯ МАТЕРІАЛІВ

Г. Г. Півняк, В. І. Кириченко, В. В. Кириченко

Національний гірничий університет, Дніпропетровськ

Надійшла до редакції 28.03.06

Резюме: Розглянуто технологічні та енергетичні показники, особливості конструкції і швидкісні режими робочих поверхонь розробленого в Національному гірничому університеті (НГУ) млина для примусового подрібнювання матеріалів у процесі підготовки руди на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

Ключові слова: млин, технологія, конструкція, параметри, режим, показники.

Г. Г. Пивняк, В. И. Кириченко, В. В. Кириченко. МЕЛЬНИЦЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ.

Резюме: Рассмотрены технологические и энергетические показатели, особенности конструкции и скоростные режимы рабочих поверхностей разработанной в Национальном горном университете мельницы для принудительного измельчения материалов в процессе подготовки руды на предприятиях горно-металлургического комплекса.

Ключевые слова: мельница, технология, конструкция, параметры, режим, показатели.

G. G. Pivnyak, V. I. Kirichenko, V. V. Kirichenko. MILLS AND TECHNOLOGY OF THE FORCED GROWING OF MATERIALS SHALLOW.

Abstract: Technological and power indexes, features of construction and speed modes of working surfaces of the mill of the forced growing of materials shallow, developed in the National mining university for the resource-economy in the processes of ore-preparation of enterprises of mining and smelting complex, are considered.

Keywords: mill, technology, construction, parameters, mode, indexes.

1. АКТУАЛЬНІСТЬ РОЗРОБКИ

Енергетична безпека держави визначається, в першу чергу, наявністю достатньої кількості власних енергоносіїв. При їх імпорті вельми вагомим чинником є диверсифікація джерел постачання, яка сприяє встановленню економічно виправданих цін на цю складову вартості продукції підприємств гірничо-металургійного комплексу (ГМК), де на операції дроблення та подрібнювання за різними даними

витрачається від 5 до 20 % всієї споживаної в Україні електроенергії. З цієї кількості до 70 % припадає на найбільш енерговитратну операцію подрібнювання. Одна з причин цього полягає в тому, що коефіцієнт корисної дії (ККД) традиційно вживаних для подрібнювання обертальних млинів складає 0,4–2 %.

Про важливість зниження енергетичних витрат свідчить те, що виробничі потужності сучасних гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) чорної металургії нерідко сягають

35–40 млн т на рік, а питомі енерговитрати на подрібнювання до крупності концентрату (98 % класу 0,071 мм) залежно від міцності сировини складають 14–21,7 кВт·год/т. Додаткові витрати ГЗК зумовлені спрацюванням куль і футерівки, які для ГЗК Кривбасу становлять 0,09 і 0,007 кг на кожну витрачену на подрібнювання кВт·год енергії відповідно.

Серед чинників, які безпосередньо визначають рівень енергетичних і матеріальних витрат ГЗК, назвемо такі:

- спосіб передачі енергії від двигуна до барабана млина та від нього до подрібнювальної сировини;
- використання або відсутність куль;
- частота обертання млина та режим роботи внутрішньомлинового завантаження;
- ефективність захисту робочих поверхонь від спрацювання;
- енергетика руйнування сировини;
- ступінь використання встановленої потужності приводу.

При потужності залізрудного комбінату 40 млн т на рік витрата електроенергії сягає 800 млн кВт·год при річній потребі в кулях близько 60, а футерівки – 4 тис. т. Кошторис цих витрат близький до 60 млн дол. США, з яких половина йде за споживану електроенергію. Таким чином, в умовах значних витрат на ГЗК енергетичних і матеріальних ресурсів впровадження ефективних способів їх економії для України набуває стратегічного значення.

2. КРИТЕРІЇ ЕКОНОМІЇ РЕСУРСІВ

Передача енергії від барабана до подрібнювальної сировини супроводжується витратами енергії на спрацювання футерівки та куль. Тому збільшення частки енергії руйнування поза межами робочої поверхні млина сприяє зниженню питомих витрат енергії на одиницю готового продукту. Випробуваннями в проми-

слових умовах доведено, що використання квадратного профілю футерівки, яке збільшило частку подрібнювання у внутрішніх прошарках завантаження млина, знизило питомі витрати енергії подрібнювання на 15–19 % [1]. Додатковим резервом економії є використання самозахисту футерівок великоуламковою фракцією подрібнювальної сировини, зокрема при використанні надкритичної частоти обертання барабана. Щодо зменшення витрат енергії на спрацювання куль, то важливо вибирати їх за доцільними розмірами та матеріалами, дотримувати у барабані оптимальне співвідношення сировина/кулі та стабілізувати раціональний гранулометричний склад куль. Відчутної економії електроенергії можна досягти завдяки попередньому стисканню сировини послідовно у різних напрямках до рівня 50–250 МПа. За рахунок цього у кульових млинах витрати енергії знижуються на 71–80 % [2]. Важливим чинником при цьому є частота обертання млина, яка визначає співвідношення часток руйнування ударом, роздавлюванням, стиранням тощо. В результаті випробувань у промислових умовах доведено, що для міцних руд переведення частот обертання млинів з 0,76–0,88 на 0,5 від критичної дало можливість знизити витрати електроенергії на 7 % [3]. Ефект було досягнуто за рахунок підвищення частки руйнування стиранням і роздавлюванням. Використання цього методу руйнування сировини приводить до зменшення витрат енергії вдвічі при експлуатації баштових млинів у процесі подрібнювання неміцних та дрібних матеріалів [4]. До зниження питомих витрат енергії приводить підвищення швидкості прикладання зусиль руйнування, коли швидкість розповсюдження пружної деформації граничного рівня перевищує швидкість утворення окремих тріщин в об'ємі частинок бажаного розміру [5]. Крім того, економії сприяють дотримання раціонального співвідношення між крупністю дроблення та подрібнення, оптимальних зна-

чень густини пульпи, циркуляційного навантаження та кількості стадій подрібнювання, а також перехід на самоподрібнювання тощо.

3. ТЕХНОЛОГІЯ ПРИМУСОВОГО ПОДРІБНЮВАННЯ

Врахування визначених принципів економії енергетичних та матеріальних ресурсів, а також намагання поєднати їх в одній конструкції зумовили розробку в НГУ принципово нової технології примусового подрібнювання [6]. В основу її покладені перехід на самоподрібнювання для повнішого розкриття корисної компоненти і зменшення витрат металу для подрібнювального середовища; використання явища примусової поперечної сегрегації внутрішньомлинового завантаження для періодичного оновлення великоуламкової фракції на робочій поверхні з метою самозахисту її футерівки від спрацювання; перенесення основної частки енергії руйнування у внутрішні прошарки подрібнювальної сировини; інтенсифікація силового впливу на сировину під-

вищенням швидкості прикладання критичних зусиль для її інтенсивного стирання, сколювання і роздавлювання послідовно у різних напрямках; можливість оптимізації режиму подрібнювання.

Використання методу самоподрібнювання замість кульового означає вилучення витрат на кулі з відповідною економією матеріальних і енергетичних витрат, прийнятне за наявності великоуламкової фракції подрібнювальної сировини. За її відсутності при додатковому подрібнюванні концентратів, промислових продуктів чи порошоків необхідне використання подрібнювального середовища у вигляді куль, гальки або рудної гальки тощо.

Вплив ефекту поперечної сегрегації внутрішньомлинового завантаження на можливість збільшення частини роботи подрібнювання поза межами футерівки робочих поверхонь млина показано на рис. 1, де для зручності частина рудної фракції виділена білим кольором [7]. У вихідному стані (до зсуву) ця частина фракції була розташована на одній вертикалі. З рисунка видно, що завдяки за-

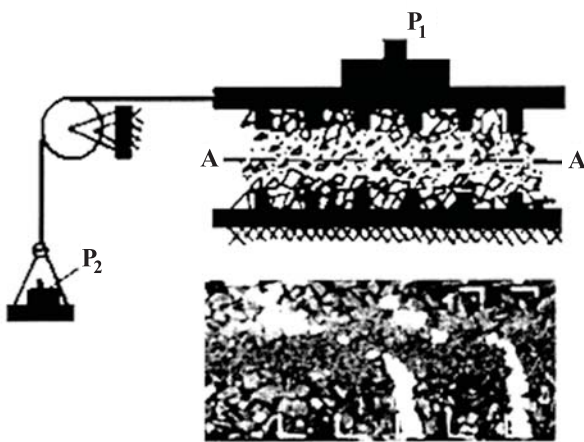


Рис. 1. Умовна схема для ілюстрації ефекту виникнення зсуву у внутрішніх прошарках сегрегованої рудної маси під впливом стискуючого P_1 та зсувного P_2 зусиль (вгорі) та результати випробування на стенді з розташуванням шару дрібної фракції руди між шарами великоуламкової (вниз)

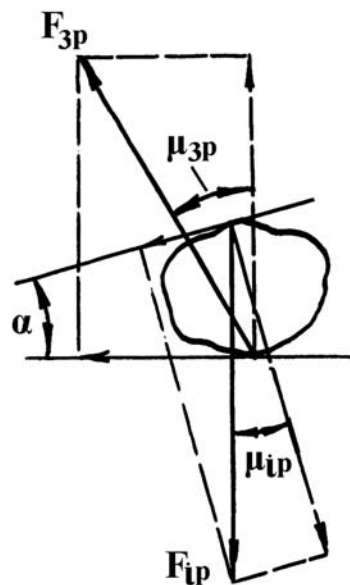


Рис. 2. Схема до розрахунку результуючого зусилля втягування куска у клиновидну зону

лежності коефіцієнта тертя від крупності частинок руди та рівня їх стискання після взаємного зміщення стиснутих шарів матеріалу їх зсув відбувся у зоні, віддаленій від робочих поверхонь. Отже, цим було підтверджено, що поперечна сегрегація внутрішньомлинового завантаження забезпечує передумови для перенесення основної роботи подрібнювання від робочих поверхонь млина у внутрішні прошки подрібнювальної сировини.

Для розвитку роздавлювального зусилля, достатнього для руйнування, використовувалось стискання матеріалу при його втягуванні у клиновидну зону під впливом прикладених тангенціальних зусиль у напрямку звуження зони (рис. 2). Втягування матеріалу забезпечує тангенціальна складова зусилля реакції завантаження $F_{зр}$ з боку рухомої нижньої робочої поверхні, причому вона повинна перевищувати опір тангенціальної складової реакції верхньої робочої поверхні $F_{ір}$ (зусилля реакції інтенсифікатора під час руху). Поліпшує надійність втягування куска сировини одночасний рух верхньої робочої поверхні у бік звуження клиновидної зони. Рівень відносного обтискання матеріалу повинен бути достатнім для розвитку зусиль руйнування роздавлюванням.



Рис. 3. Ілюстрація самофутерування футерівки барабана при надкритичній частоті його обертання

Для підвищення швидкості прикладання до куска руйнівних напружень роздавлювання, стирання та сколювання була використана надкритична частота обертання барабана, що за рахунок центрифугування частини завантаження млина створює передумови надійного захисту його футерівки від спрацювання. З рис. 3 видно, що завдяки розташуванню всередині барабана додаткової робочої поверхні у вигляді відрізка спіралі створена вигнута клиноподібна зона, одна із поверхонь якої є центрифугувальний шар з частини внутрішньомлинового завантаження. При більшому заповненні барабана сировина заповнює цю зону, інтенсивно втягується в неї з розвитком зусиль, достатніх для роздавлювання кусків і стирання дрібної фракції.

Ефект примусової поперечної сегрегації завантаження виникає внаслідок періодичного стискання матеріалу при втягуванні у клиноподібну зону та наступного розпушування при виході з неї в зоні ділянок з пружною футерівкою. В умовах надкритичної частоти обертання ефект сегрегації приводить до підсилення проникнення дрібних частинок завантаження на поверхню центрифугувального шару внаслідок дії відцентрових сил. З іншого боку, використання на поверхні спіралі поздовжніх щілин забезпечує розташування на ній лише великоуламкової фракції завантаження, яка захищає футерівку спіралі від спрацювання. Поліпшує надійність її захисту створення умов для періодичного оновлення спрацьованих кусків сировини свіжими.

4. КОНСТРУКЦІЯ МЛИНА ПРИМУСОВОГО САМОПОДРІБНЮВАННЯ

Для практичної реалізації нової технології в промислових умовах в НГУ була розроблена нова конструкція, яка отримала назву *ресурсозберігаючий барабанний млин примусового самоподрібнювання* – МПС(Р).

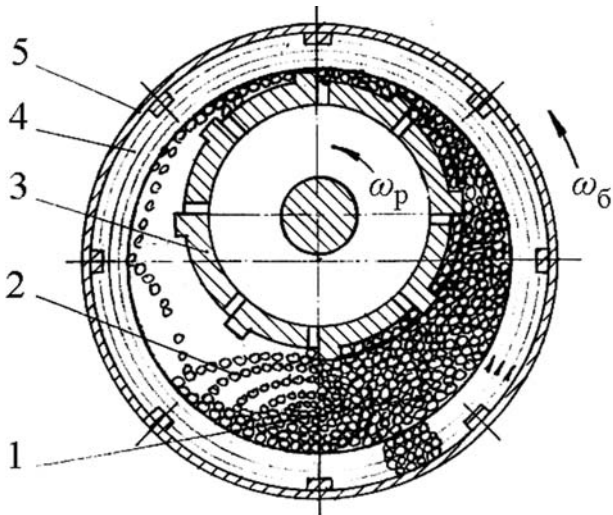


Рис. 4. Поперечний розріз барабана ресурсозберігаючого млина примусового самоподрібнювання МПС(Р): 1 – клиновидна зона; 2 – шар обвалювання; 3 – обертальний перфорований циліндр; 4 – центрифугувальний шар; 5 – барабан

Основна конструктивна новизна млина (рис. 4) полягає у розміщенні всередині його барабана, що має комбіновану футерівку, обертального (з кутовою частотою ω_p, c^{-1}) перфорованого циліндра на винесених опорах. Таке конструктивне рішення забезпечує значне (у декілька разів) зростання корисної потужності млина навіть на докритичних частотах обертання барабана $\omega_б, c^{-1}$. Комбінована футерівка барабана складається з почергово розташованих ділянок малої та високої жорсткості у радіальному напрямку. Це забезпечує розвиток зусиль, достатніх для роздавлювання сировини у клиновидній зоні (ділянка з жорсткою футерівкою) та ефективно розпушування центрифугувального шару (ділянка пружної футерівки) після виходу сировини із зони. Частина внутрішньомлинового завантаження утворює шар обвалювання, який сприяє утворенню свіжих поверхонь внаслідок ударного впливу. Центрифугувальний шар подрібнювальної сировини забезпечує самозахист від спрацювання футерівки барабана,

а поперечні щілини обертального циліндра здійснюють примусову затримку великоуламкової фракції завантаження на його робочій поверхні, яка внаслідок обертання циліндра періодично оновлюється. Завдяки необхідному співвідношенню кутових частот обертання барабана $\omega_б$ і циліндра (ротора) ω_p забезпечені умови для розвитку напружень стискування та стирання і сколювання, достатніх для роздавлювання сировини. Залежно від частоти обертання барабана $\omega_б$ можливе використання традиційних або нових типів завантажувально-розвантажувальних пристроїв.

Перевагами млина МПС(Р) є можливість роботи із звичайними та підвищеними (надкритичними) частотами обертання, примусове підсилення поперечної сегрегації та перенесення енергії подрібнення у внутрішні прошарки завантаження млина. Руйнування у млині відбувається роздавлюванням, стиранням, сколюванням та ударом у бажаному співвідношенні. Млин працює без та з використанням подрібнювальних тіл, у мокрому та сухому, відкритому та замкненому режимах.

5. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ

Ефективність розробленої технології обґрунтована випробуваннями примусового подрібнювання руд із вмістом металів, їх концентратів, проміжних продуктів самоподрібнювання, графіту, тальку, діопсиду, алмазовмісної сировини тощо. В умовах промислового виробництва у відкритому мокрому циклі млина потужністю 11 кВт проводили самоподрібнення руди з кусками розміром -15 мм та міцністю до 18 одиниць за шкалою Протод'яконова. Питомі витрати електроенергії в цьому випадку склали 16 кВт-год/т (у промислових умовах для кусків руди розміром -30 мм загальні витрати на дроблення та подрібнювання складають 46,9 кВт-год/т). Витрати футерівки зменшилися в 4 рази, зникла необхідність використання куль. При випробуваннях

млина потужністю 40 кВт в режимі мокрого подрібнювання промислових продуктів із вмістом заліза витрати енергії склали 15 кВт·год/т (для промислового кульового млина вони складають лише 27,7 кВт·год/т).

При сухому примусовому подрібнюванні нерудних матеріалів теж було досягнуто суттєвої економії електроенергії. Так, сухе примусове кульове подрібнювання тальку у млині потужністю 30 кВт з частотою обертання 1,75 від критичної забезпечило питомі витрати електроенергії 17,6 кВт·год/т (у промисловому кульовому млині вони складають 36,6 кВт·год/т, а об'єм барабана є у 6 разів більшим). Примусове кульове подрібнювання графіту для потреб електротехнічної промисловості дало питомі витрати енергії 322 кВт·год/т (для промислового млина "Фулер" вони перевищують 1 500 кВт·год/т). При сухому примусовому кульовому подрібнюванні дробленого діопсиду енерговитрати зменшилися втричі. Підвищення тиску на завантаження вугільного кульового млина в процесі приготування вугільного пилу збільшило продуктивність і зменшило енергетичні витрати вдвічі, а примусове самоподрібнювання руди із вмістом алмазів виявило можливість збереження їх природної форми.

6. СПРЯМОВАНІСТЬ І СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

Розробка НГУ спрямована на промислове впровадження млинів примусового самоподрібнювання з підвищеною економією енергетичних та матеріальних витрат в процесах переробки корисних копалин.

Сфера застосування нової технології і млинів – це чорна та кольорова металургія, будівельна промисловість, електроенергетика, отримання вугільного пилу, матеріалів підвищеної білизни, сплюсненості та дисперсності в хімічній, електротехнічній та інших галузях. У нових млинів питома витрата енергії мен-

ша на 10–30 % і більше, а економія футерівки сягає до 50–75 %, причому при подрібнюванні кускових матеріалів кулі не потрібні.

За попередніми розрахунками заміна традиційних млинів на нові дасть залізорудному підприємству потужністю 40 млн т/рік річну економію близько 55 тис. т куль і футерівки та до 85 млн кВт·год електроенергії. При цьому експлуатаційні витрати зменшаться на 24–30 млн дол. США, а капітальні (за рахунок відносного зниження маси млинів на 4 тис. т) – до 9,5 млн дол. США.

Вилучення куль і менші розміри сприяють зниженню рівня шумів і вібрацій, а підвищення частоти обертання – зменшенню маси і вартості двигунів, зростанню їх ККД. Розробка не має аналогів у світі, захищена авторськими свідоцтвами на винахід та патентом України [8].

7. ГОТОВНІСТЬ ДО ВПРОВАДЖЕННЯ

На сьогодні у відповідності до вимог технології гірничо-збагачувальних підприємств в НГУ відпрацьовані опитувальний формуляр необхідних вихідних даних; методики визначення розмірів нового млина, частот обертання його робочих поверхонь та основних конструктивних співвідношень; методика визначення та обґрунтування очікуваного економічного ефекту від впровадження розробки у конкретне промислове підприємство. Для гарантійного визначення показників нової технології і виключення ризику підприємства при замовленні нового типорозміру млина вченими НГУ розроблений, виготовлений і змонтований на другій рудозбагачувальній фабриці Північного ГЗК (м. Кривий Ріг) експериментальний млин МПС(Р)-1200x700 із встановленою потужністю приводів 360 кВт. Млин призначений для подрібнювання кусків сировинних матеріалів розміром -30 мм та додаткове подрібнювання промислових продуктів і концентратів у мокрому замкне-

ному режимі зі спіральним класифікатором. При необхідності у млині можливе сухе подрібнювання.

Згідно з вимогами ВАТ "Михайлівський гірничо-збагачувальний комбінат" (Росія) та господарського договору із ЗАТ "Ново-Краматорський машинобудівний завод" у НГУ були відпрацьовані техніко-економічне обґрунтування і технічне завдання на проектування та виготовлення ресурсозберігаючого млина МПС(Р)-3600х3100. Млин призначений для заміни універсального кульового млина МШРГУ-4500х6000 із встановленою потужністю приводного двигуна 2 500 кВт. Відповідно до вимог замовника у млині був збережений привід від базового млина, причому новий млин максимально адаптований до існуючих фундаментів і технологічного устаткування дробильно-збагачувального комбінату. Нині ЗАТ "Ново-Краматорський машинобу-

дівний завод" відпрацювало технічний проект нового млина. Його номінальна продуктивність за вихідним живленням – до 200 т/год; крупність сировини – -20 мм; крупність подрібнювальної гальки – -100 мм; об'єм барабана – 27 м³; відносна частота обертання – 1,16; розміри циліндра – 2300×2300 мм; кратність частоти обертання циліндра – 0,69; корисна потужність – 1 940 кВт; маса млина – 230 т. Використання млина в умовах замовника забезпечує річний економічний ефект 0,85 млн дол. США при терміні окупності до 1,5 року (з урахуванням додаткових витрат розробника млина на проектні роботи та підготовку виробництва). Для серійного зразка економічний ефект сягає 1 млн дол. США при терміні окупності 7 місяців. Загальна схема нового млина наведена на рис. 5.

За розрахунками для Інгулецького ГЗК (м. Кривий Ріг) заміна рудногалькового млина

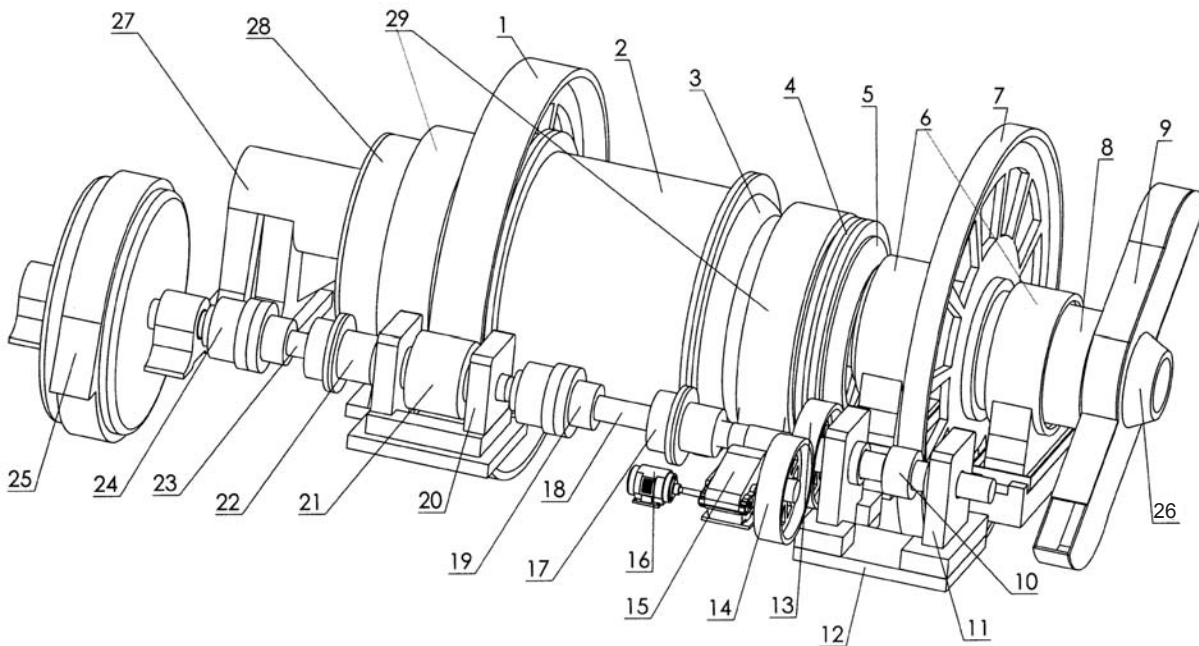


Рис. 5. Загальна схема млина примусового подрібнювання МПС(Р)-3600х3100: 1 – зубчасте колесо; 2 – барабан із футерівками; 3 – цапфа із завантажувальною спіраллю; 4 – стакан із завантажувальними спіралями; 5 – кришка; 6, 11, 20, 27, 28 – опори; 7 – колесо; 8 – вал; 9, 26 – равликовий комбінований живильник; 10, 13, 14, 21 – привідні шестерні; 12 – плита; 15 – редуктор; 16, 25 – двигун; 17, 19, 22, 24 – муфти; 18, 23 – промвал

МГР-4000x7500 на млин МПС(Р)-2700x2300 у 2-й стадії додаткового подрібнювання промислових продуктів забезпечить річний економічний ефект в розмірі близько 4 млн грн.

За наявності даних опитувального формуляра, технологічної схеми подрібнювання та креслень існуючих фундаментів на замовлення підприємства НГУ готовий розробити техніко-економічне обґрунтування і технічне завдання, а ЗАТ "Ново-Краматорський машинобудівний завод" – відпрацювати технічний проект, робочі креслення і виготовити млин нового типу на вимогу замовника.

8. ВИСНОВКИ

Сучасний стан підготовки руди на ГМК свідчить про невиправдано великі витрати електроенергії і матеріальних ресурсів. Схожа ситуація спостерігається і на підприємствах будівельної, хімічної та інших галузей виробництва. В умовах зростання вартості витрат та подорожчання подрібнювального устаткування проблема розробки і впровадження в промисловість нових технологій подрібнювання і барабаних млинів набрала надзвичайної ваги. Для потужних підприємств існує реальна небезпека втратити конкурентоспроможність своєї продукції на світовому ринку, що, як наслідок, призведе до скорочення обсягів виробництва, кількості робочих місць і зайнятості населення у виробництві. Тому сьогодні і у найближчій перспективі виробники подрібнювальної техніки змушені розробляти нове, ресурсозберігаюче устаткування для потреб споживачів. Саме в цьому напрямку вони мають можливість зберегти і підвищити обсяги виробництва та прибутки як свого підприємства, так і замовників їх продукції з

відповідними перспективами для працездатного населення.

Успішно вирішити проблеми збереження ресурсів гірничо-металургійного комплексу можливо лише за умови поєднання зусиль провідних наукових центрів, машинобудівних підприємств та проектних організацій і замовників. Одним із напрямків вирішення цього надскладного завдання є використання високоефективної технології примусового подрібнювання та розробка млинів для її практичного впровадження у промисловість, які забезпечать економію електроенергії на рівні 10–30 %, а на окремих напрямках і більше. Одночасно скоротяться на 50–75 % витрати футерувальних матеріалів, зникне необхідність у використанні металевих куль як подрібнювального середовища, зменшиться вартість електричного приводу, транспортних перевезень млинів тощо.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mill modifications for Codelco-Chile // Mining J. – 1984. – 302, № 7757. – P. 263.
2. Kellerwessel H., Rubin G. Die Gutbettzerkleinerung von Erzenwittels Rolienpressen-Chance und Herausforderung // Erzmetall. – 1987. – 40, № 4. – P. 170–176.
3. Крюков Д. К. Усовершенствование размольного оборудования горно-обогатительных предприятий. – М.: Недра, 1966. – 173 с.
4. Tower mills: installations for fine grinding // Mining Mag. – 1992. – 166, № 2. – P. 102.
5. Шинкоренко С. Ф. Моделирование процессов измельчения в барабанах вращающихся мельниц // Горн. ж-л. – 1973. – № 12. – С. 59–63.
6. Півняк Г. Г., Кириченко В. І. Ресурсозбереження та інтенсифікація процесів подрібнення. – Дніпропетровськ: НГА України, 2001. – 163 с.
7. Півняк Г. Г., Кириченко В. І. Електромеханічні системи енергонапружених барабаних млинів. – Дніпропетровськ: НГА України, 2000. – 166 с.
8. Патент України 31043А.