

СТЕПАНОВ М.С., ЛІТОВЧЕНКО П.І., ІВАНОВА М.С., КОРНІЄНКО В.О., ІВАНОВА Л.П., ФРАНЦУЗОВ В.І.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИСТКИ МОР В БАРАБАННИХ МАГНІТНИХ СЕПАРАТОРАХ НА ВАЛЬЦЕШЛІФУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТАХ

Шліфування валків прокатних станів - трудомісткий і тривалий процес, що супроводжується рясною подачею МОР у зону різання. При цьому ефективність процесу шліфування залежить також і від якості очищення МОР, яке забезпечується обраним способом очищення і конструкцією очисного пристрою: зокрема – магнітного сепаратора. У зв'язку з чим, досліджено процес очистки в магнітних сепараторах забрудненої МОР при шліфуванні валків прокатних станів, розглянуто та проаналізовано конструкції магнітних сепараторів, які використовуються для видалення забруднень з МОР. Розглянуто методи оцінки ефективності очистки магнітного сепаратора СМ5-МА і встановлено вплив концентрації забруднень на ступінь очистки. Виконано аналіз ефективного перерізу сепаратора СМ5-МА, при якому досліджено вплив швидкості проходження МОР і параметрів перерізу на якість очистки. Сформульовані напрямки і рекомендації по підвищенню ефективності конструкції барабанних магнітних сепараторів, що забезпечать зменшення питомих витрат на очистку 1 м³/г МОР при покращенні параметрів ступеня і тонкості очистки.

Ключові слова: концентрація механічних домішок, тонкість очистки, ступінь очистки МОР, критерії очистки, швидкість проходження МОР, магнітний барабан, ефективний переріз.

**STEPANOV M.S., LITOVCHENKO P.I., IVANOVA M.S., KORNIENKO V.A., IVANOVA L.P., FRANZUSOV V.I.
INCREASING THE EFFICIENCY OF COOLANT CLEANING IN DRUM MAGNETIC SEPARATORS ON ROLL GRINDING MACHINES**

Grinding of rolls of rolling mills is a laborious and lengthy process, accompanied by abundant supply of coolant to the cutting zone. At the same time, the efficiency of the grinding process also depends on the quality of coolant cleaning, which is ensured by the chosen cleaning method and the design of the cleaning device: in particular, a magnetic separator. In connection with this, the process of cleaning contaminated coolant in magnetic separators during grinding of rolls of rolling mills is studied, the designs of magnetic separators used to remove contaminated coolant are examined and analyzed. The methods of evaluating the effectiveness of the cleaning of the magnetic separator CM5-MA were considered, and the effect of the concentration of pollutants on the degree of cleaning was established. An analysis of the effective cross-section of the CM5-MA separator was carried out, during which the influence of the speed of coolant passage and cross-section parameters on the quality of cleaning was investigated. Directions and recommendations for increasing the design efficiency of magnetic drum separators have been formulated, which will ensure a reduction in specific costs for cleaning 1 m³/g of coolant while improving the parameters of the degree and fineness of cleaning.

Key words: concentration of mechanical impurities, fineness of cleaning, degree of cleaning of coolant, criteria of cleaning, speed of passage of coolant, magnetic drum, effective section.

1. Вступ. Застосування високоефективних МОР при шліфуванні валків прокатних станів не гарантує отримання максимального результату. Для найбільш повного використання потенційних можливостей МОР необхідна ефективна очистка її від механічних домішок, що накопичуються в системі застосування МОР в процесі обробки. Відомо, що вищеназвані домішки знижують, з однієї сторони, термін експлуатації МОР, а з другої сторони – погіршують параметри шліфування і якість отриманої поверхні.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій. Інтенсифікувати процес очистки МОР можна за рахунок використання енергетичної дії на рідину, що забруднена механічними домішками. До таких способів можна віднести дію, в тому числі, магнітних полів [1]. Для попередньої магнітної обробки МОР можна використовувати магнітні очисники, якщо вони забезпечують необхідні для покращення очистки параметри магнітного поля, в основному, його напруженість.

Установлено [2], що магнітна обробка МОР, яка забруднена механічними домішками, сприяє підвищенню ступеня очистки через фільтропапір.

Ефективність очистки від механічних домішок у магнітних очисниках залежить від напруженості магнітного поля, швидкості течії рідини, її в'язкості, розташування силових полів відносно напрямку руху потоку рідини та інших факторів. При дії магнітного поля на МОР, зусилля, яке притягує частинку в магнітне поле змінної напруженості, змінюється, і може поблизу полюса магніту перевищити силу ваги частинки в декілька тисяч разів.

Ефективність магнітної очистки визначається співвідношенням сил, що діють на частинку механічних домішок і залежить від розміру частинок.

Таких сил можна виділити дві: сила відриву та магнітна сила.

Сила відриву з боку потоку рідини, як сила лобового опору, визначається за формулою [3]:

$$F_p = 0,5 \rho_{\text{МОР}} k_c V_{\text{МОР-ч}}^2 S_{\text{ч}}, \quad (1)$$

де $\rho_{\text{МОР}}$ – густина очищеної МОР; k_c – коефіцієнт лобового опору; $V_{\text{МОР-ч}}$ – швидкість МОР відносно частинки; $S_{\text{ч}}$ – площа проекції частинки на площину, нормальну до осі X, яка паралельна потоку рідини.

Магнітна сила визначається за формулою [4]:

$$F_M = \chi H_m \frac{dH_m}{dx} W_{\text{ч}}, \quad (2)$$

де χ – об'ємна магнітна сприйнятливність; H_m – напруженість магнітного поля у місці знаходження частинки; W_q – об'єм частинки.

Аналіз [5] показав, що зі зменшенням розміру частинок, сила F_M убиває швидше, ніж сила F_p . Для дотримання умови, при якій не відбудеться відрив частинки, що закріпилася, від барабана магнітного сепаратора ($F_M \geq F_p$), слід або збільшити напруженість магнітного поля вздовж сепаратора, або зменшити швидкість течії МОР.

Таким чином, важливим фактором, який впливає на процес магнітної очистки, є режим течії МОР у робочому зазорі магнітного сепаратора. При цьому, турбулентний режим перешкоджає магнітному осадженню частинок.

В роботі [6] стверджується, що у патронному магнітному сепараторі на ступінь очистки МОР від частинок розміром менше 5 мкм впливає відстань між патронами в ряду. При її збільшенні з 2 до 10 мм ступінь очистки зменшується з 75 до 15%, тобто геометричні параметри сепаратора є факторами, що впливають на ступінь очистки.

Ступінь очистки у магнітному очиснику залежить від швидкості течії рідини. Зменшення швидкості течії рідини сприяє зменшенню тонкості очистки (рис. 1) [7].

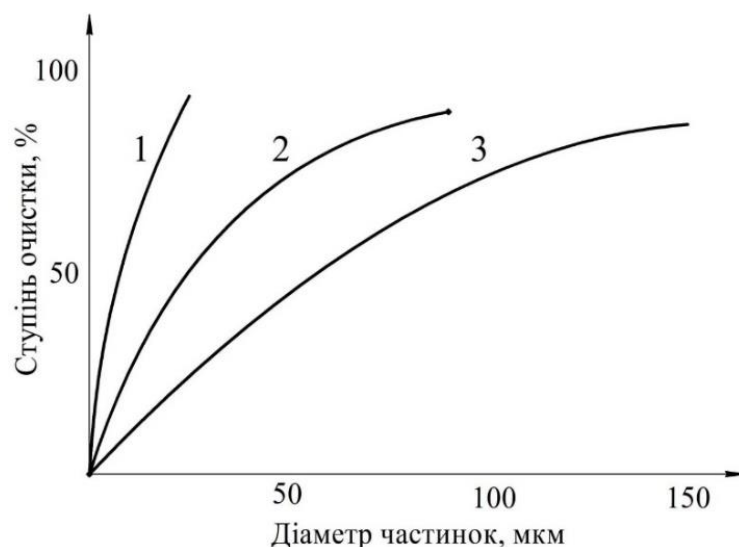


Рис. 1 – Вплив витрати рідини через магнітний очисник на ступінь очистки частинок різного розміру: 1 – 1/4 номінальної витрати; 2 – номінальна витрата; 3 – подвійна номінальна витрата

При проектуванні магнітних сепараторів для очистки МОР можна використовувати постійні магніти з литих сплавів АН, АНК, АНКО з різною конфігурацією, наприклад, кільцеві, багатополюсні, призматичні з циліндричною полюсною поверхнею і ін. [8, 9].

Барабан магнітного сепаратора може уявляти з себе набір ферито-барієвих магнітних елементів (6БИ240). Ферит барія уявляє собою хімічну сполуку $Ba \cdot 6Fe_2 \cdot O_3$, кристали якого мають гексагональну атомну структуру і одне переважне намагнічування, паралельне гексагональній осі.

Технологія виготовлення барієвих магнітів, особливо ізотропних, не є складною і подібна технології виготовлення керамічних деталей, що дає можливість отримати оптимальну для прийнятої конструкції сепаратора форму магнітного елемента.

Для підвищення ефективності магнітних очисників за рахунок збільшення площі взаємодії магнітного елемента з робочою рідиною, зменшення швидкості рідини при збереженні параметрів магнітів, отримали поширення різноманітні форми магнітних елементів. Наприклад, відомі конструкції, в яких магнітні елементи виконано у вигляді зірочок, що утворюють своїми западинами серію проточних каналів, по яким рухається рідина.

Дослідження [10] показують, що підвищення ефективності магнітних сепараторів з постійними магнітами можливе за рахунок підтримання визначеного функціонального стану об'єкту сепарації, яке досягається його попередньою обробкою.

Запропоновано [11] новий тип відкритого градієнтного магнітного сепаратора з використанням кількох джерел магнітного поля, зокрема з використанням квадрупольного електромагніту, що дозволяє здійснити безперервний поділ парамагнітних частинок діаметром у кілька десятків мікрометрів.

Дослідження магнітних елементів різної форми показали, що еліптичні елементи забезпечують більші на 10-15% значення складових магнітної індукції у порівнянні з кільцевими, однак, щоб уникнути ускладнень конструктивного і технологічного характеру, найбільш доцільно використовувати магнітні елементи саме кільцевої і дискової форми для патронних магнітних сепараторів [12]. В магнітному сепараторі СМ5-МА в середині барабана закріплено постійні магніти в кількості 24 штуки, які мають арочну дугоподібну форму.

При магнітній очистці МОР металеві частинки, які коагулюють, захоплюють із собою неметалевий шлам (абразивні частинки, які є відходами і продуктами зносу шліфувального круга).

Технологія і техніка очистки МОР, в тому числі, в барабанних магнітних сепараторів, постійно удосконалюються [13].

В результаті досліджень встановлено оптимальні режими очистки МОР в барабанному магнітному сепараторі СМЗМА: $V=1-2$ м/с, концентрація шламу в МОР 25-30% [14].

Між тим, дослідження очистки МОР в магнітних пристроях показали і інші результати. За даними [15] ступінь очистки МОР при швидкості $V=1$ м/с частинки діаметром $d=10$ мкм, складає 60%. В той же час, при швидкості $V=0,2$ м/с ступінь очистки підвищується до 98%.

Барабанні магнітні сепаратори, що випускаються серійно, є дешевими, однак забезпечують гірші (у порівнянні з іншими магнітними очисниками) значення тонкості і ступеня очистки при високих капітальних затратах на очистку $1 \text{ м}^3/\text{год}$. Це пояснюється деякими конструктивними особливостями, а саме, малим ефективним робочим перерізом [12].

Крім усього іншого дуже важливу роль для продуктивності очистки має видалення шламу. У деяких наукових роботах [16] стверджується, що основним недоліком пристроїв для магнітної сепарації на постійних магнітах є складність розвантаження видалених феромагнітних включень, що потребує розробки нових варіантів конструкцій пристроїв. У роботі [17] запропоновано конструкцію магнітного сепаратора для очищення МОР від феромагнітних частинок, спорядженого пристроєм для очистки шламозбірних циліндричних магнітних дисків при задовільній продуктивності.

Таким чином, спираючись на розглянуті результати досліджень, можна зробити висновок, що актуальною проблемою очистки МОР при шліфуванні вальців прокатних станів є низька ефективність процесу, що проявляється у нестабільних показниках ступені і тонкості очистки МОР.

3. Мета дослідження. Проаналізувати процеси очистки у магнітних сепараторах барабанного типу, встановити фактори, що впливають на продуктивність і якість очистки і розробити рекомендації щодо вдосконалення конструкцій барабанних магнітних сепараторів і параметрів очистки.

4. Викладення основного матеріалу. Головною особливістю експлуатації барабанних магнітних сепараторів для очистки МОР на вальцешліфувальних верстатах є їхня робота в екстремальних умовах. Вказані умови визначаються значним машинним часом обробки, підвищеною забрудненістю МОР і великими об'ємами рідини, що проходять через сепаратор. У зв'язку з цим у системах застосування МОР можуть виникати відмови (рис.2 і табл.1).



Рис. 2 – Експлуатаційні характеристики магнітних сепараторів

При роботі із водоемульсійними МОР рекомендують відтискний валик знімати [18]. Однак, в умовах значних витрат МОР з підвищеною забрудненістю це може привести до підвищеної вологості шламу, який виділяється.

Особливо цей процес інтенсифікується в умовах обробки із самозаточуванням шліфувального круга [19].

За даними [12], барабанні магнітні сепаратори, що випускаються серійно, є найдешевшими пристроями серед магнітних очисників МОР, однак мають найгіршу ефективність очистки МОР внаслідок конструктивних особливостей – малого ефективного перерізу (рис. 3.) При цьому питомі капітальні витрати на очистку $1 \text{ м}^3/\text{год}$ самі високі.

Таблиця 1 – Технічні характеристики барабаних магнітних сепараторів для очистки МОР шліфувальних верстатів

Параметри	Умовні позначення сепараторів		
	СМ5-МА	МСА240	X43-45
Номінальна продуктивність дм ³ /хв	200	240	200
Діапазон температури МОР, °С	10-55	1-70	10-55
Кінематична в'язкість МОР при температурі 20°С, мм ² /с	1,405-1,408		
Температура навколишнього середовища, °С	1-40		
Магнітна система	24*	170**	
МОР	3-5% розчин емульсора у воді		
Габаритні розміри, мм	564x728x680(454)	285x525x296	240x730x300
* – кількість магнітів; ** – діаметр магнітного елемента, мм			

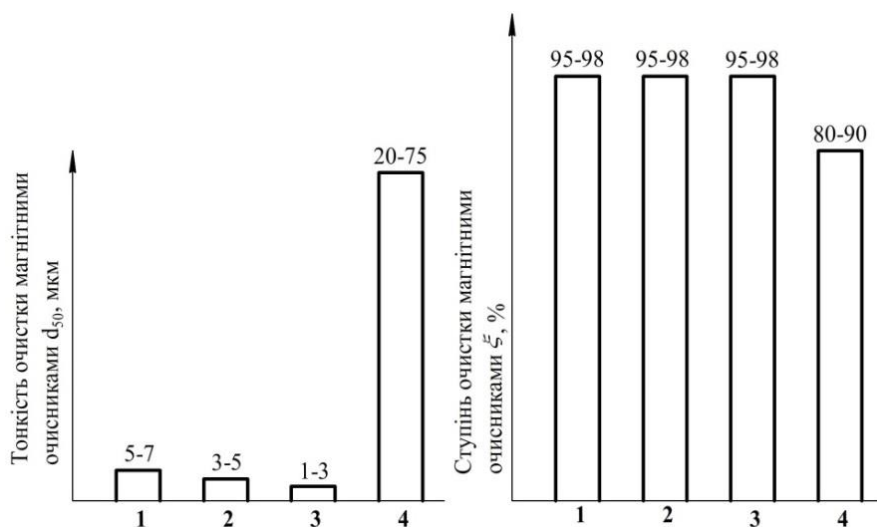


Рис. 3 – Ефективність очистки МОР магнітними очисниками: 1, 2, 3 і 4 – електромагнітний, ланцюговий, касетний і барабанный сепаратори [8]

В роботі [20] за допомогою числового моделювання отримано результати розрахунку барабанного магнітного сепаратора на постійних магнітах. При визначенні ступеня очистки МОР використовували ваговий і гранулометричний аналіз. Ваговий аналіз проводили двома методами.

Перший метод передбачав одночасне взяття проб МОР об'ємом 100 мл на вході у магнітний сепаратор (на виході з верстата) і на його виході. Концентрація забруднень визначалася шляхом фільтрування МОР через спеціальний папір з розміром пор у ньому 5-10 мкм с наступною сушкою і зважуванням забруднених фільтрів.

При використанні другого методу, фільтри, що володіють значною пропускнуою здатністю, встановлювалися перед і після магнітного сепаратора. Протягом визначеного часу t_c увесь об'єм МОР, що витікає з верстата проходить через фільтри з розміром пор 25-30 мкм. При цьому забезпечується максимальна витрата МОР [10].

Ступінь очистки по другому методу визначається за формулою:

$$\xi = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100\% , \quad (3)$$

де m_1 – маса забрудненого фільтра на вході сепаратора, г; m_2 – маса забрудненого фільтра на виході із сепаратора, г.

Гранулометричний склад оцінювали із застосуванням мікроскопічного аналізу і спеціальної методики [7].

Результати досліджень ефективності очистки магнітного сепаратора СМ5-МА (рис. 4) свідчать про наступне: при збільшенні концентрації забруднень у МОР від 0,37 до 1,05 г/дм³ ступінь очистки збільшується від 59,46 до 88,57%. Подальше збільшення концентрації механічних домішок до 2,1 г/дм³ призводить до зниження ступеню очистки до 76,19%. По оцінці ступеня очистки обидва методи дали практично ідентичні результати.

При використанні другого методу ступінь очистки складає 90,2% (розбіг результатів склав біля 1,5%),

що показано на рис. 5.

При розгляданні проб під мікроскопом, встановлено, що частинки розміром 15-20 мкм і більше сепаратор відбирає практично повністю (рис. 6). Кількість і розмір абразивних частинок залишається практично без змін.

На рис. 7 приведено мікрофотографії проб МОР, відібрані до (рис. 7, а) і після (рис. 7, б) магнітного сепаратора.

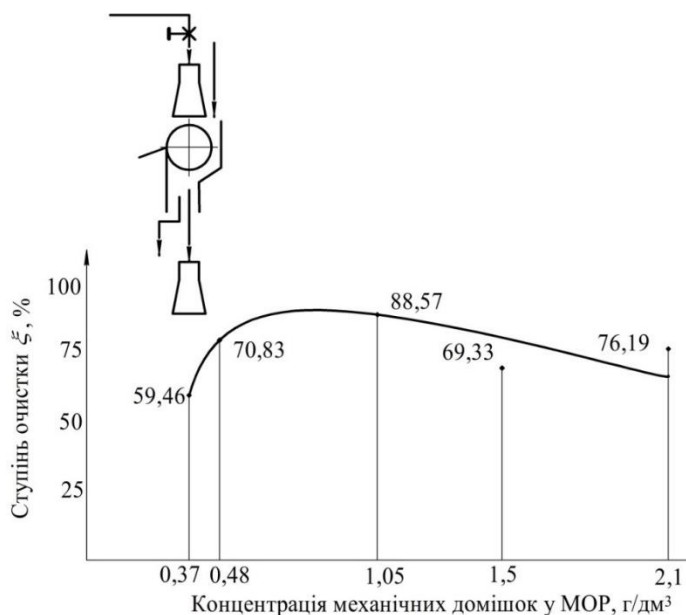


Рис. 4 – Вплив концентрації механічних домішок, що містяться в МОР, на ступінь очистки магнітним сепаратором СМ5-МА

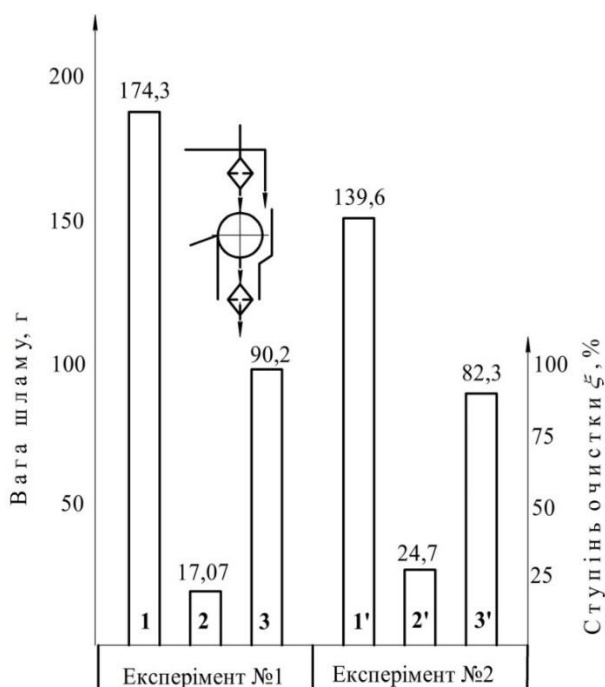


Рис. 5 – Дослідження ефективності очистки МОР магнітним сепаратором: 1 і 2 – вага шламу, г, на фільтрі перед і після магнітного сепаратора, відповідно; 3 – ступінь очистки.

Аналіз ефективного перерізу сепаратора СМ5-МА свідчить про те, що площину його завищено мінімум в 2,5 рази за рахунок ширини.

Збільшення ширини зазору негативно відбивалося на очисній можливості сепаратора. Однак, незважаючи на це, швидкість потоку в зазорі у півтори рази більше за необхідну.

Максимальна ефективність магнітної очистки від дрібнодисперсних частинок при ширині зазору 0,01 м і швидкості проходження МОР повинна складати 0,1 м/с.

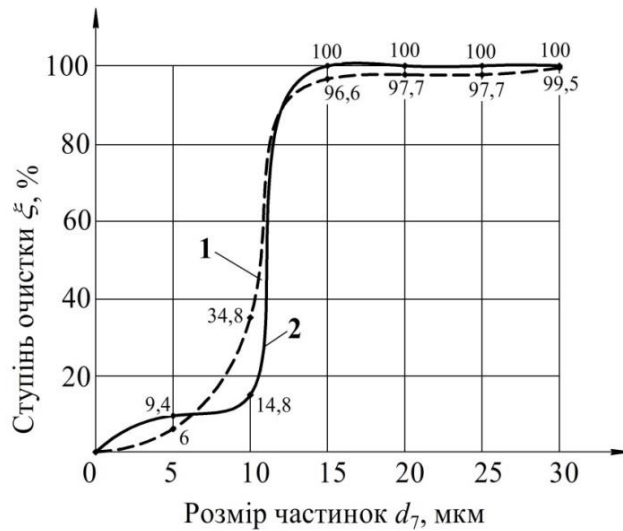


Рис. 6 – Графік зміни ступеню очистки магнітного сепаратора CM5-MA : 1 і 2 – номер експерименту

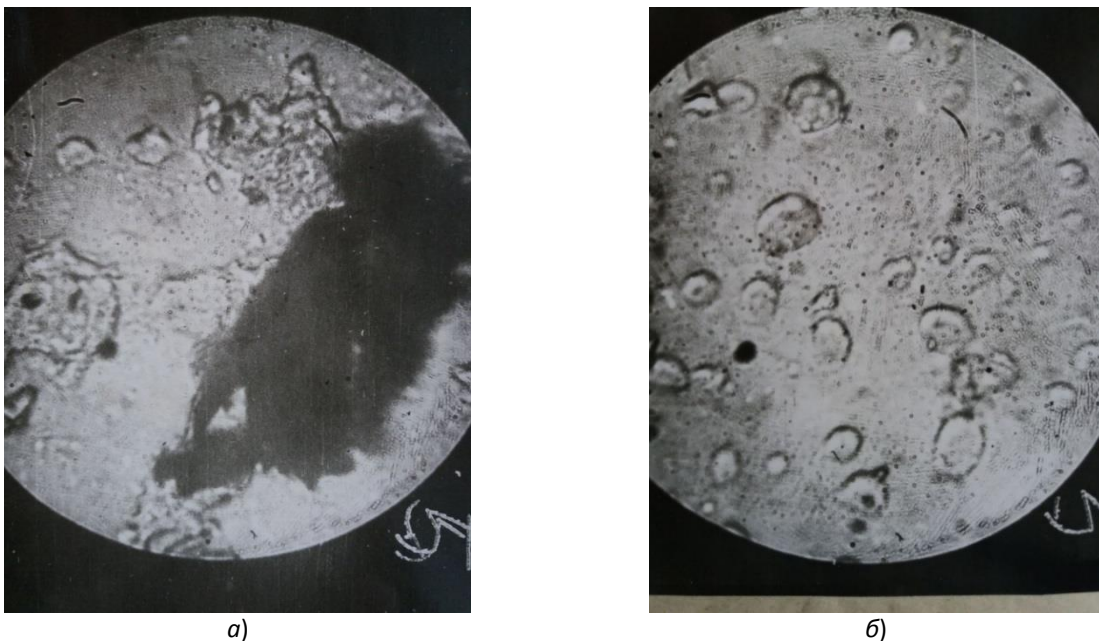


Рис. 7 – Мікрофотографії проб МОР, які відібрано на вході а) і на виході б) магнітного сепаратора.

Задавши дані значення швидкості потоку МОР, можна визначити площу ефективного перерізу по формулі:

$$S_{7c} = \frac{Q_{MOP}}{V_{MOP}} \quad (4)$$

Нескладні розрахунки показують, що для сепаратора CM5-MA ці вимоги не виконуються. При дотриманні цих умов довжина магнітного барабана може досягати 3 м, що в 3 рази більше, ніж у відомих аналогічних конструкцій.

Якщо при мінімальній швидкості потоку (0,01-0,02 м/с) МОР у зазорі не забезпечується задана ступінь очистки, тоді збільшують напруженість магнітного поля H за рахунок збільшення діаметру магнітного елемента.

Зауважимо, що зменшення швидкості потоку МОР до 0,01 м/с призводить до ще більш значного збільшення габаритів барабана і сепаратора в цілому.

Проведені дослідження і досвід експлуатації очисників МОР на вальцешліфувальних верстатах дозволили визначити основні напрямки підвищення ефективності очистки в магнітних сепараторах (рис. 8).

Спираючись на вказані напрямки розроблено нові конструкції барабаних магнітних сепараторів, які забезпечують зменшення питомих витрат на очистку 1 м³/г МОР при покращенні параметрів ступеня і тонкості очистки.



Рис. 8 – Основні напрямки підвищення ефективності очистки МОР в барабаних магнітних сепараторах

Висновки.

1. Досліджено процес очистки в магнітних сепараторах забрудненої МОР при шліфуванні валків прокатних станів, що обумовлено їхньою роботою в екстремальних умовах великим об'ємом потрібної МОР, тривалим машинним часом обробки, підвищеною забрудненістю МОР.

2. Розглянуто та проаналізовано конструкції магнітних сепараторів, які використовуються для видалення забруднень з МОР при роботі на вальцешліфувальних верстатах. Систематизовано їхні характеристики з точки зору їх переваг, недоліків і можливих експлуатаційних несправностей.

3. Розглянуто два методи оцінки ефективності очистки магнітного сепаратора СМ5-МА, які показали, що при збільшенні концентрації забруднень у МОР від 0,37 до 1,05 г/дм³ ступінь очистки збільшується від 59,46 до 88,57%. Подальше збільшення концентрації механічних домішок до 2,1 г/дм³ призводить до зниження ступеню очистки до 76,19%.

4. Проведено аналіз ефективного перерізу сепаратора СМ5-МА, який показав, що площа його завищена мінімум в 2,5 рази за рахунок ширини. При цьому збільшення ширини зазору негативно впливає на очисні можливості сепаратора при тому, що швидкість потоку в зазорі у півтори рази більше за необхідну. Максимальна ефективність магнітної очистки від дрібнодисперсних частинок при ширині зазору 0,01 м і швидкості проходження МОР 0,1 м/с. Крім того, при невеликій швидкості потоку МОР (до 0,01 м/с) необхідно значно збільшувати габарити сепаратора в цілому.

5. За результатами досліджень сформульовано напрямки і рекомендації по підвищенню ефективності конструкції барабаних магнітних сепараторів, що забезпечать зменшення питомих витрат на очистку 1 м³/г МОР при покращенні параметрів ступеня і тонкості очистки.

Список літератури:

11. Бердичевский Е.Г. Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
12. Булыжев Е.М. К вопросу оптимизации режимов работы аппаратов для магнитной обработки СОЖ, загрязненных механическими примесями при шлифовании. Физико-химическая механика процесса трения. – НГУ, Иваново, 1977. – С. 63-65.
13. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергия, 1975. – 600 с.
14. Полиградиентные магнитные сепараторы. Под. обш. ред. Мясникова Н.Ф. – М.: Недра, 1973. – 158 с.
15. Сандуляк А.В., Федоткин И.М. Магнитное обезжелезивание конденсата. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 88 с.
16. Наумова Н.Н. Эффективность очистки СОЖ от частиц размером менее 5 мкм в кассетном патронном магнитном сепараторе / Вестник УлГТУ, 4/2006. С. 40-53.
17. Коновалов В.М., Скрицкий В.Я. Рокшевский В.А. Очистка рабочих жидкостей в гидроприводах станков. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
18. Гавриш А.П. Шлифование и доводка магнитных материалов. – М.: Машиностроение, 1985. – 118 с.
19. Худобин Л.В., Бударин А.М., Сальковский Ф.М. и др. Технология обработки высокоэффективных магнитных сплавов. – М.: Энергия, 1989. – 184 с.
20. T. Dimova, V. Arahamian, M. Marinova and M. Streblau, "Increasing the efficiency of permanent magnet separators by maintenance of certain functional state of the object of separation," 2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIELA.2014.6871849.
21. S. Fukui et al., "Study on open gradient magnetic separation using multiple magnetic field sources," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 12, no. 1, pp. 959-962, March 2002, doi: 10.1109/TASC.2002.1018559.
22. Булыжев Е.М., Худобин Л.В. Ресурсо-сберегающее применение смазочно-охлаждающих жидкостей при металлообработке. – М.: Машиностроение, 2004. – 352 с.
23. Климов Е.С., Литвиненко А.И., Назаров С.В. Технология очистки отработанных смазочно-охлаждающих жидкостей от ферромагнитных примесей. – Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2009. №5. – С. 99-101.
24. Михайлов Н.Д. Эффективность селективной сепарации шлама от заточки твердосплавного инструмента с применением СОЖ. Смазочно-охлаждающие средства в процессе абразивной обработки. Сб. науч. трудов. – Ульяновск, 1988. – С.96-101.
25. Булыжев Е.М., Вельмисов П.А., Решетников Ю.А. и др. Математическое моделирование процесса очистки СОЖ в патронном магнитном сепараторе. Смазочно-охлаждающие средства в процессе абразивной обработки. Сб. науч. трудов. – Ульяновск, 1992. – С.71-77.
26. Шведчикова И.А., Мелконова И.В. Экспериментальная проверка трудоспособности дискового магнитного сепаратора новой конструкции. Вісник Східноукр. національн. ун-та ім. В. Даля.–2019.–№1– С. 125-130.
27. Литвиненко А.Н., Сулейманов И.Р., Ягудин Д.Р. Разработка магнитного сепаратора для очистки смазочно-охлаждающих жидкостей от ферромагнитных частиц/«Молодой учёный», 2010 г. Том 1. № 5 (16). – С. 77-80.
28. Худобин Л.В., Бердичевский Е.Г. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке. Справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1977. – 189 с.
29. Пермяков А.А., Жижев А.А. Повышение эффективности предварительного шлифования прокатных валков за счет восстановления режущей способности круга без правки. Вісник Сев. НТУ. Сер. Машинобудування та транспорт. Вип. 118. 2011. – С. 113-118.

30. Лозин А.А., Арсенюк В.М., Петровский Е.Б. Использование информационных технологий при расчете и моделировании стационарных магнитных систем в конструировании сепараторов на постоянных магнитах / Горный журнал, 2004, №5. – С. 64-68.

References (transliterated)

1. Berdichevskiy Ye.G. Smazочно-okhlazhdayushchiye sredstva dlya obrabotki materialov: Spravochnik. – M.: Mashinostroyeniye, 1984. – 224 s.
2. Bulyzhev Ye.M. K voprosu optimizatsii rezhimov raboty apparatov dlya magnitnoy obrabotki SOZH, zagryaznennykh mekhanicheskimi primesyami pri shlifovanii. Fiziko-khimicheskaya mekhanika protsessa treniya. – NGU, Ivanovo, 1977. – S. 63-65.
3. Chugayev R.R. Gidravlika. – L.: Energiya, 1975. – 600 s.
4. Poligradiyentnyye magnitnyye separatory. Pod. obsh. red. Myasnikova N.F. – M.: Nedra, 1973. – 158 s.
5. Candulyak A.V., Fedotkin I.M. Magnitnoye obezhezhelevaniye kondensata. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 88 s.
6. Naumova N.N. Effektivnost' oчитki SOZH ot chastits razmerom meneye 5 mkm v kassetnom patronnom magnitnom separatore / Vestnik UIGTU, 4/2006. С. 40-53.
7. Konovalov V.M., Skritskiy V.YA. Rokshevskiy V.A. Oчитka rabochikh zhidkostey v gidroprivodakh stankov. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 288 s.
8. Gavrish A.P. Shlifovaniye i dovodka magnitnykh materialov. – M.: Mashinostroyeniye, 1985. – 118 s.
9. Khudobin L.V., Budarin A.M., Sal'kovskiy F.M. i dr. Tekhnologiya obrabotki vysokoeffektivnykh magnitnykh splavov. – M.: Energiya, 1989. – 184 s.
10. T. Dimova, B. Aprahamian, M. Marinova and M. Streblau, "Increasing the efficiency of permanent magnet separators by maintenance of certain functional state of the object of separation," 2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIELA.2014.6871849.
11. S. Fukui et al., "Study on open gradient magnetic separation using multiple magnetic field sources," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 12, no. 1, pp. 959-962, March 2002, doi: 10.1109/TASC.2002.1018559.
12. Bulyzhev Ye.M., Khudobin L.V. Resurso-sberegayushcheye primeneniye smazочно-okhlazhdayushchikh zhidkostey pri metalloobrabotke. – M.: Mashinostroyeniye, 2004. – 352 s.
13. Klimov Ye.S., Litvinenko A.I., Nazarov S.V. Tekhnologiya oчитki otrabotannykh smazочно-okhlazhdayushchikh zhidkostey ot ferromagnitnykh primesey. – Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskkiye nauki. – 2009. №5. – S. 99-101.
14. Mikhaylov N.D.. Effektivnost' selektivnoy separatsii shlama ot zatochki tverdosplavnogo instrumenta s primeneniyyem SOZH. Smazочно-okhlazhdayushchiye sredstva v protsesse abrazivnoy obrabotki. Sb. nauch. trudov. – Ul'yanovsk, 1988. – S.96-101.
15. Bulyzhev Ye.M., Vel'misov P.A., Reshetnikov YU.A. i dr. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa oчитki protsessa oчитki SOZH v patronnom magnitnom separatore. Smazочно-okhlazhdayushchiye sredstva v protsesse abrazivnoy obrabotki. Sb. nauch. trudov. – Ul'yanovsk, 1992. – S.71-77.
16. Shvedchikova I.A., Melkonova I.V. Eksperimental'naya proverka trudospособnosti diskovogo magnitnogo separatora novoy konstruksii. Visnik Skhidnoukr. natsional'n. un-ta im. V. Dala.–2019.–№1– S. 125-130.
17. Litvinenko A.N., Suleymanov I.R., Yagudin D.R. Razrabotka magnitnogo separatora dlya oчитki smazочно-okhlazhdayushchikh zhidkostey ot ferromagnitnykh chastits«Molodoy uchonyy», 2010 g. Tom 1. № 5 (16). – S. 77-80.
18. Khudobin L.V., Berdichevskiy Ye.G. Tekhnika primeneniya smazочно-okhlazhdayushchikh sredstv v metalloobrabotke. Spravochnoye posobiye. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 189 s.
19. Permyakov A.A., Zhizhev A.A. Povysheniye effektivnosti predvaritel'nogo shlifovaniya prokatnykh valkov za schet vosstanovleniya rezhushchey sposobnosti kruga bez pravki. Visnik Sev. NTU. Ser. Mashinobuduvannya ta transport. Vip. 118. 2011. – S. 113-118.
20. Lozin A.A., Arsenyuk V.M., Petrovskiy Ye.B. Ispol'zovaniye informatsionnykh tekhnologiy pri raschete i modelirovanii statsionarnykh magnitnykh sistem v konstruirovanii separatorov na postoyannykh magnetakh / Gornyy zhurnal, 2004, №5. – S. 64-68.

Поступила (received) 31.01.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Степанов Михайло Сергійович (Mykhailo Stepanov) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2224-6509>; тел.: (057) 707-66-25. e-mail: mykhaylo.stepanov@khpі.edu.ua.

Літовченко Петро Іванович (Petro Litovchenko) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4483-597X>, тел. 063-141-65-97, e-mail: pilitovchenko1950@gmail.com.

Іванова Марина Сергіївна (Maryna Ivanova) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0848-6805>; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: maryna.ivanova@khpі.edu.ua.

Корнієнко Володимир Олександрович (Volodymyr Korniyenko), студент гр. МІТ-М222в Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4141-2972>; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: korney130893@gmail.com.

Іванова Лариса Петрівна (Larysa Ivanova) – старший викладач кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2390-7372>, e-mail: larisanangu@gmail.com.

Французов Віктор Іванович (Viktor Franzusov), старший викладач кафедри «Деталі машин та пневмогідросистеми» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2285-2568>; тел.: 063-393-80-82. e-mail: frantsuzov952@gmail.com.