

УДК 621.927

Особенности магнитовибрационной технологии сепарации шламов шлифовального производства

Ю. М. Вернигоров, Д. М. Плотников, Н. Н. Фролова

(Донской государственный технический университет)

При утилизации отходов механической обработки методами порошковой металлургии коэффициент использования металла возрастает с 0,4 до 0,95. Снижаются энергозатраты на получение изделий. При сепарации шламов, образующихся в процессе шлифования стальных деталей, перспективным подходом является ожигание дисперсных ферромагнитных материалов в магнитном поле. В неоднородном электромагнитном поле эффективно разрушаются конгломераты шлама, удерживающие абразив, в результате чего возможно качественное разделение магнитной и немагнитной фракции шлама. Описан механизм и основные блоки магнитовибрационной технологии сепарации шлифовальных шламов подшипникового производства. Приведена методика определения оптимальных режимов магнитных полей, при которых осуществляется эффективное разделение магнитной и немагнитной фракций. Приведённая расчётная модель позволяет определить интервал градиента индукции переменного магнитного поля, при котором разрушаются конгломераты шлифовального шлама. Абразив, выделенный из шлама, использовали при литье по выплавляемым моделям. Металлическая компонента шлама применялась при обмазке электродов для дуговой сварки.

Ключевые слова: сепарация, шлифовальный шлам, магнитовибрирующий слой, отделение СОЖ, магнитное поле.

Введение. С каждым годом становится всё более актуальной проблема создания экологически чистого ресурсосберегающего промышленного производства. Это обусловлено рядом обстоятельств: сокращением и истощением природных запасов, увеличением их стоимости; ужесточением требований к охране окружающей среды и, в частности, к экологической чистоте и безопасности производственных технологий. В настоящее время главное требование при использовании отходов — получение немедленного практического результата.

На предприятиях машиностроения и металлургии, осуществляющих обработку металлов, ежемесячно образуются тысячи тонн металлосодержащих шламов. Это во много раз больше, чем отходов с операций опилки и обкатки. Особенно сложен по составу шлифовальный шлам. Это смесь мелкой металлической стружки, абразива, технических масел, смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и т. д. В металлосодержащих отходах содержится значительное количество неметаллических включений и технических масел, поэтому они не могут использоваться в качестве вторичного сырья без предварительной переработки. Частично решён вопрос со стружкой, которую прессуют в брикеты. Однако наличие на поверхности брикетированной стружки остатков технических масел и смазочно-охлаждающих жидкостей приводит к интенсивной коррозии металла. Кроме того, не исключается опасность самовоспламенения. К настоящему времени технологии переработки и обогащения шлифовальных шламов и отходов металлургических производств недостаточно развиты для успешного внедрения на производстве.

Основные преимущества утилизации отходов механообработки (стружки и шламов) методами порошковой металлургии заключаются в том, что устраняется угар легирующих элементов. Значительно сокращаются затраты на транспортировку, поскольку обрабатывать отходы можно будет на предприятии, где они образуются. Снижаются потери и засорённость шлама при его транспортировке и хранении. Коэффициент использования металла возрастает с 0,4—0,6 до 0,85—0,95. При необходимости возможно дополнительное легирование такими компонентами,

которые нельзя ввести в расплавленный металл. Это улучшает эксплуатационные свойства получаемых изделий. Существенно снижаются энергозатраты [1, 2].

Фирма «Бритиш стил Корпорэйшн» (Англия) предложила собственный способ переработки шламов в порошок [3]. Кроме того, известен способ получения порошка из шлама [4] при механическом отделении жидкой составляющей. Она отжимается двумя цилиндрическими валками, вращающимися в противоположных направлениях. Шлам подают к отжимным валкам транспортной лентой. После отжима остаток масла удаляют растворителем, а твёрдую составляющую отжигают в печи в восстановительной атмосфере. Полученную губку измельчают, металлическую фракцию отделяют от абразива магнитной сепарацией. При таком способе трудно получить материал, свободный от неметаллических включений, так как спёк при размоле может образовывать конгломераты металлических частиц с абразивными включениями, которые невозможно извлечь традиционной магнитной сепарацией.

Цель работы. Описание последовательности технологических операций магнитовибрационной сепарации шлифовального шлама подшипникового производства, обеспечивающих высокоэффективное разделение магнитной и немагнитной составляющих шлама.

Экспериментальная часть. Для достижения поставленной цели предложено использовать сепарацию в неоднородном электромагнитном поле. Это позволит разрушить агрегаты, выделить абразив и получить продукты переработки высокой чистоты. Магнитовибрационный сепаратор должен отвечать следующим требованиям.

1. Комплекс оборудования и транспортировочные средства должны быть компактны. Это необходимо для удобной транспортировки на другое предприятие (например, в случае истощения запасов отходов).

2. Перерабатывать шлам в больших количествах, быть экологически чистым и потреблять разумное количество энергии.

3. Все блоки сепаратора должны быть обеспечены датчиками, совместимыми с ЭВМ и позволяющими гибко менять параметры работы механизмов и магнитных полей.

Блок-схема устройства, обеспечивающего разделение магнитной и немагнитной фракции шлама, приведена на рис. 1.

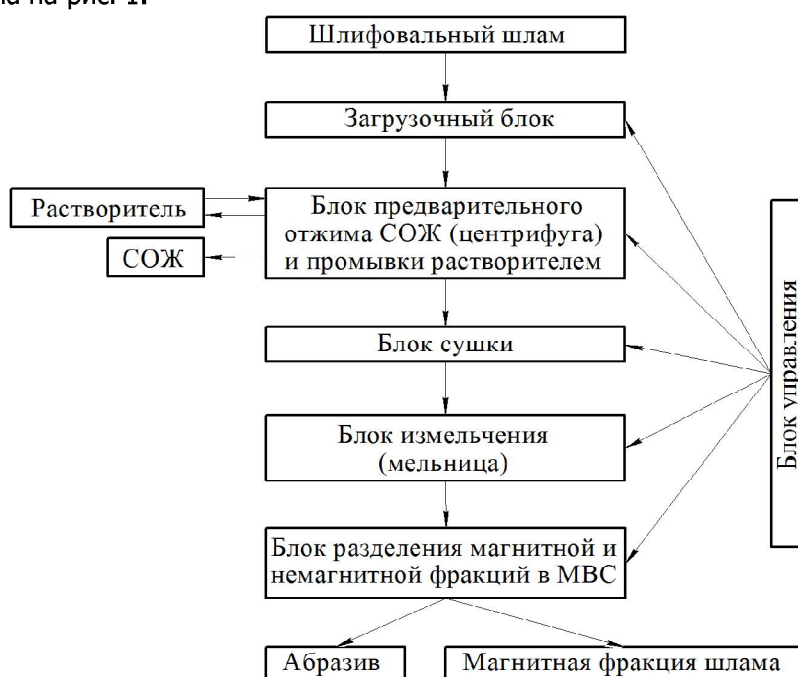


Рис. 1. Блок-схема сепаратора

Комплекс по переработке шлифовального шлама включает в себя следующие компоненты:

- 1) загрузочный блок с дозатором,
- 2) блок предварительного отжима СОЖ (центрифуга) и промывки остатков СОЖ (промывка растворителем),
- 3) блок сушки (конвейер, проходящий через камеру с температурой 200°C),
- 4) блок измельчения (мельница),
- 5) блок разделения фракций шлама (рис. 2).

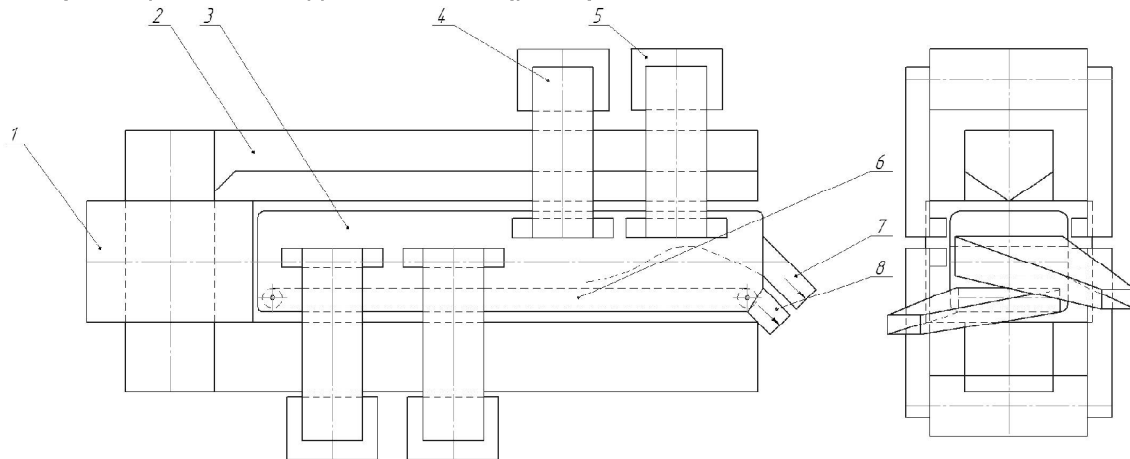


Рис. 2. Блок разделения магнитной и немагнитной фракции шлама

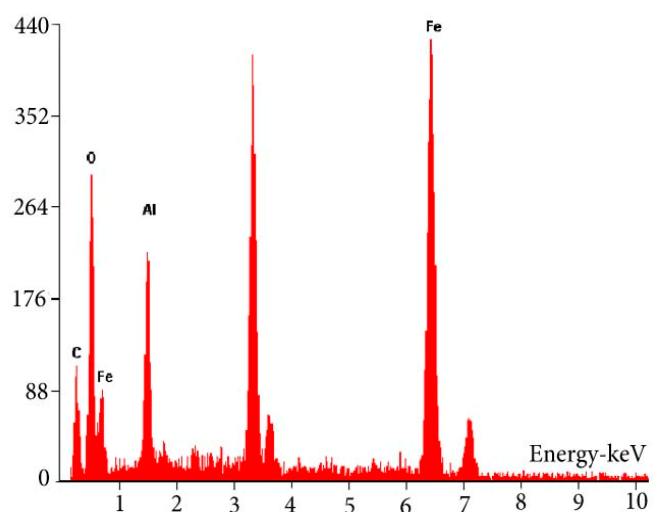
Последний блок представляет собой камеру, помещённую между полюсами пермеаметра (электромагнит переменного поля) и группой электромагнитов постоянного поля. Силовые линии полей пермеаметра (2) и магнитов постоянного поля (4) взаимно перпендикулярны. Через камеру (3) проходит конвейерная лента (6), на которой оседает отделившийся абразив и перемещается к выпускной горловине (8). Электромагниты постоянного поля работают циклично для перемещения порции псевдокипящей магнитной фракции вдоль камеры к выпускной горловине (7).

Шлам попадает в камеру (3). Здесь создаётся электромагнитное поле постоянного магнита. За счёт действия сил притяжения этого поля шлам притягивается в область, где создаётся магнитовибрирующий слой (МВС). В результате происходит интенсивное псевдокипение шлама, и на дно камеры осыпается абразив, который удаляется на выгрузку транспортёрной лентой.

Чистоту получаемого металлического порошка, то есть эффективность процесса сепарации, определяли по методу нерастворимого остатка ГОСТ16412.8-70.

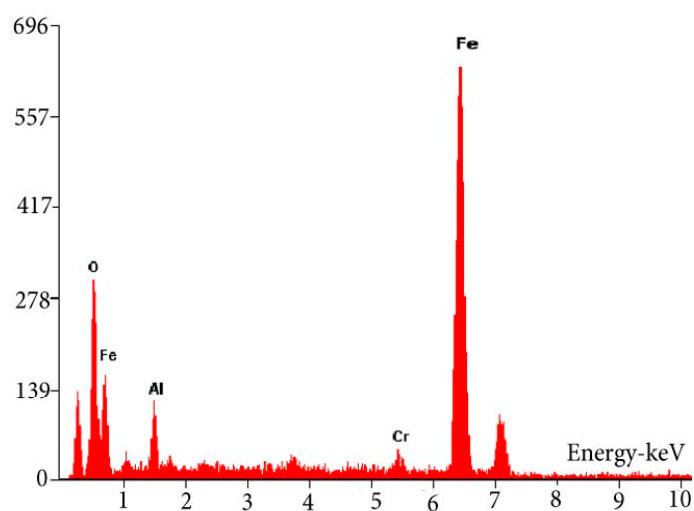
Приведённые на рис. 3, а, б, в гистограммы и таблицы получены при помощи растрового микроскопа с рентгеновским анализатором, который позволяет определить процентное соотношение элементов в изучаемой области порошка. На рис. 3, а представлены составляющие исходного шлама. Проведённый анализ показал, что содержание абразива в шламе составляет примерно 6—10 % массовых. В дальнейшем это подтвердилось при проверке шлифовального шлама на нерастворимый остаток. Элементный состав, полученный после обезжиривания и сушки, приведён на рис. 3, б.

Из сравнения рис. 3, а и 3, б следует очевидный вывод, что элементный состав меняется незначительно. Более существенно изменяет элементный состав операция измельчения (рис. 3, в).



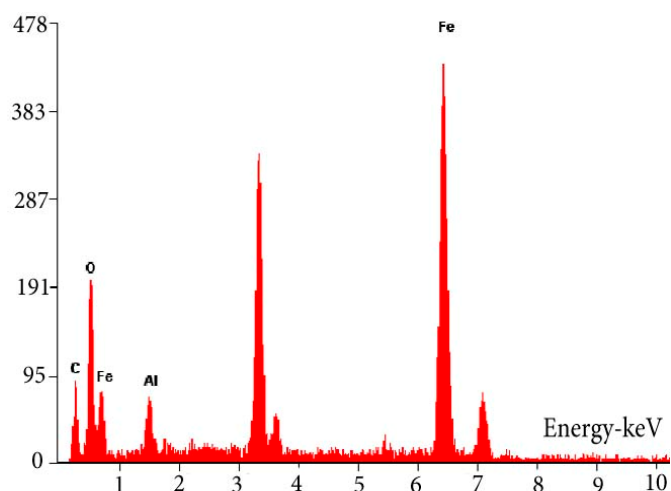
a)

Element	Wt %	At %
C	32,77	47,82
O	36,16	39,61
Al	08,39	05,45
Fe	22,68	07,12



б)

Element	Wt %	At %
O	32,15	59,27
Al	08,59	09,39
Cr	01,21	00,69
Fe	58,05	30,66



в)

Element	Wt %	At %
C	31,29	48,34
O	33,12	38,42
Al	03,98	02,74
Fe	31,60	10,50

Рис. 3. Гистограмма элементного распределения составляющих шлама: исходного (а); после операции обезжиривания и сушки (б); после операции измельчения (в)

Было исследовано влияние индукции постоянного поля, градиента индукции переменного поля и времени сепарации на процесс разделения магнитного и немагнитного компонентов шлифовальных шламов стали ШХ15 ОАО «10-ГПЗ».

На рис. 4 представлены зависимости относительной массы отделившегося абразива от градиента индукции переменного поля при различных значениях времени сепарации. Данные графиков свидетельствуют о том, что эта зависимость выше на отрезке изменения градиента индукции поля пермеаметра от 0,450 до 0,540 Тл/м. Этот участок характеризуется слабым кипением, но даже при данных параметрах магнитных полей слабо связанный абразив отделяется. Далее наблюдается снижение массы отделившегося абразива (0,540—0,610 Тл/м), которое объясняется неустойчивым режимом магнитооживления шлама и влиянием процесса агломерации его частиц на отделение абразива.

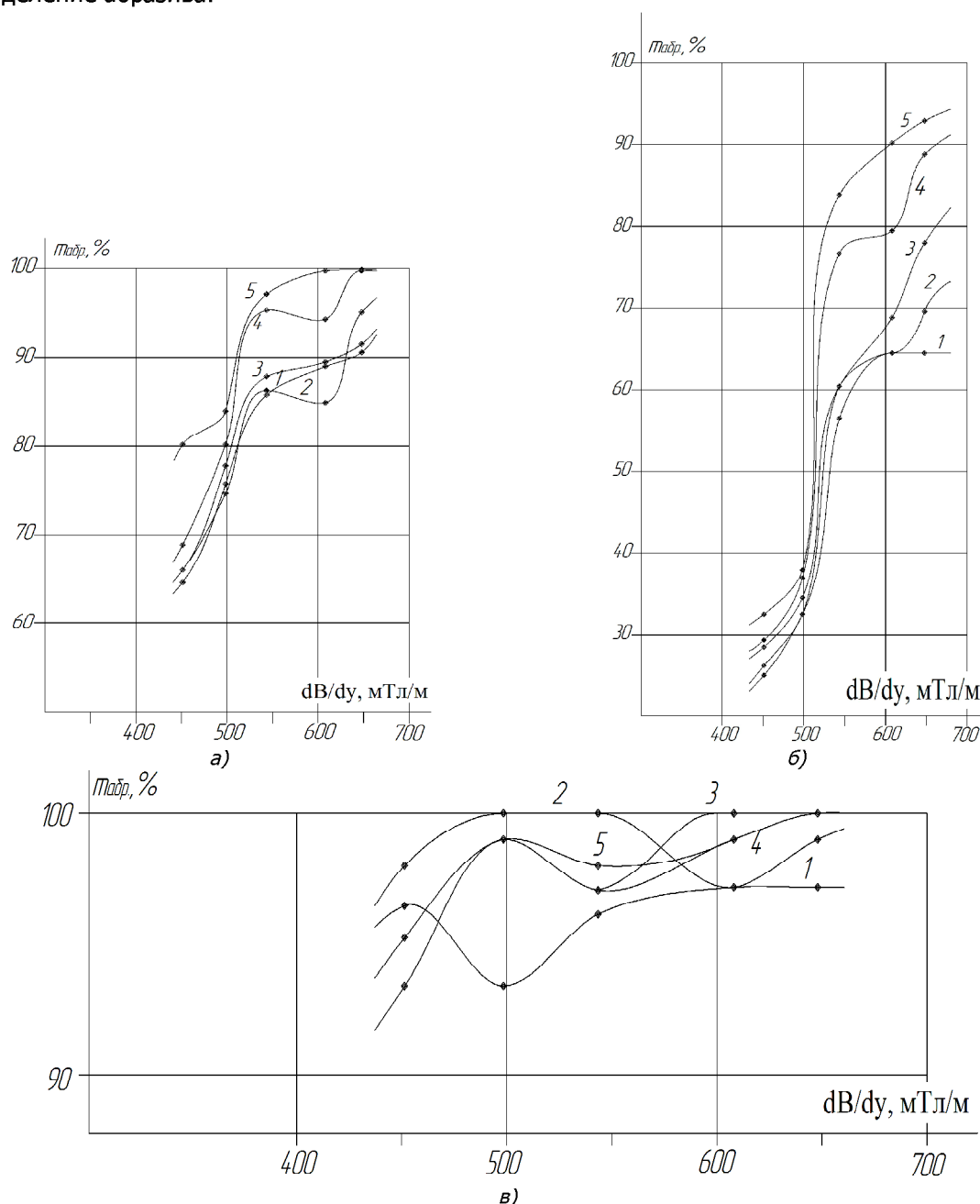


Рис. 4. Зависимость относительной массы отделившегося абразива от градиента индукции поля пермеаметра dB/dy при индукции постоянного поля $B_c = 36$ мТл. Время сепарации 150 с (а), 300 с (б), 600 с (в)

Увеличение времени сепарации повышает её эффективность в интервале градиента индукции поля от 550 мТл/м до 610 мТл/м. Экспериментально установлено, что при слабом псевдокипании шлифовального шлама в металлическом порошке остаётся не отделившимся примерно 10 % абразива.

Расчётная модель. Полученные экспериментальные результаты можно объяснить в рамках кластерной модели псевдокипания дисперсных систем [5]. Тонкодисперсные порошки магнитожёстких материалов в состоянии свободной насыпки стремятся к образованию разновеликих агломератов. Теоретические расчёты магнитостатического взаимодействия одинаковых намагниченных шаров в приближении плоских структур указывают на возможность появления при высоких концентрациях дисперсной фазы гексагональных агломератов, обладающих отличной от нуля спонтанной намагниченностью [6]. Магнитные моменты кластеров невелики из-за частичного замыкания магнитных потоков частиц кластеров.

Можно сделать следующие предположения.

1. Диссипация энергии в магнитокипящей дисперсной фазе компенсируется подкачкой энергии из магнитного поля.

2. Приращением $\vec{P}_m$ в переменном магнитном поле пренебрегаем и считаем магнитный момент агрегата постоянным.

3. Повышение индукции магнитного поля способствуют повышению устойчивости агрегата к внешним воздействиям — его разрушение эффективно лишь при малых значениях индукции магнитного поля.

4. Значение градиента индукции переменного поля вдоль оси OY существенно превышает значения градиента вдоль любого другого направления (рис. 5).

5. Взаимодействие агломератов подчиняется законам сухого трения.

При действии на порошок переменным магнитным полем с определёнными параметрами происходит кажущееся изменение коэффициента сухого трения. Этот эффект является аналогом более простого виброреологического эффекта [5].

Рассмотрим два агломерата, отличающихся размерами и удерживаемых друг относительно друга силой магнитостатического взаимодействия F (рис. 5). Предположим, ориентация агломератов такова, что сила тяжести G параллельна поверхности их касания. Со стороны неоднородного переменного поля на агломерат действует гармоническая сила F_v , коллинеарная G .

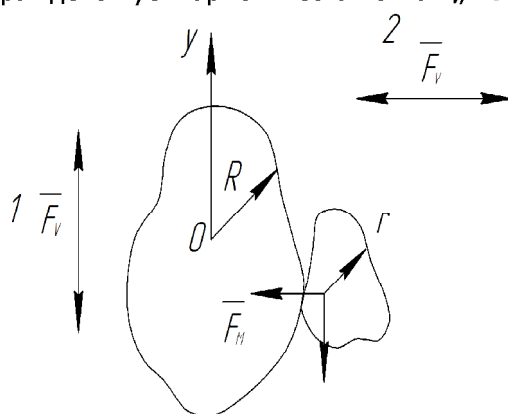


Рис. 5. Модель разрушения агрегата из частиц шлама. Здесь $\vec{F}_v = \vec{F}_0 \sin \omega t$; $\vec{F}_0 = P_m \frac{\partial B}{\partial y} \cos \varphi$, где φ — угол между вертикальной осью и магнитным моментом P_m малого агломерата, $\frac{\partial B}{\partial y}$ — изменение индукции магнитного поля вдоль вертикальной оси

Агрегат большего размера обладает большей инерционностью и при малых амплитудах F_0 или достаточно больших частотах воздействия ω не успевает за изменением поля. Малый агрегат начнёт перемещаться относительно большего, если выполняется условие [7]

$$\vec{G} = f_1 \vec{F}_m - \vec{F}_0,$$

где f_1 — коэффициент трения покоя.

Коэффициент трения взаимодействующей пары агломератов шлама для случаев вертикальной и горизонтальной ориентации переменной силы, обозначенных на рис. 5 цифрами 1 и 2, равен

$$f_{(1)} = \frac{G}{F_m} = f_1 \left[1 - \frac{F_0}{f_1 F_m} \right], \quad f_{(2)} = f_1 \left[1 - \frac{F_0}{F_m} \right]. \quad (1)$$

Сила магнитостатического взаимодействия пары агрегатов в рамках диполь-дипольного приближения [8] определяется выражением:

$$F_m = \frac{\mu_0 P_1 P_2}{4\pi r R (r + R)^2}, \quad (2)$$

где P_1 и P_2 — магнитные моменты большого и малого агрегатов соответственно; r , R — эквивалентные размеры малого и большого агрегата; μ — магнитная постоянная.

Учитывая, что градиент индукции переменного поля направлен вдоль вертикальной оси, а также выражения (1) и (2), запишем:

$$f_{(1)} = f_1 \left[1 - \frac{4\pi r R (r + R)^2}{\mu_0 f_1 P_m} \frac{\partial B}{\partial y} \cos \varphi \right]. \quad (3)$$

Если гармоническая сила перпендикулярна G (случай 2, рис. 5), то эффективный коэффициент сухого трения определяется таким же выражением, за исключением множителя f в квадратной скобке. Соотношение (3) имеет смысл до тех пор, пока эффективный коэффициент трения остаётся положительным. При больших градиентах индукции поля происходит кажущееся изменение характера трения. При этом принято считать, что эффективные коэффициенты сухого трения обращаются в нуль [9]. Последнее позволяет из (3) оценить значение градиента индукции поля, при котором происходит кажущийся переход трения из сухого в вязкое:

$$\frac{\partial B}{\partial y} \geq \frac{\mu_0 f_1 P_m}{4\pi r R (r + R)^2 \cos \varphi}. \quad (4)$$

Поведение дисперсной системы при этом определяется наличием кажущегося внутреннего вязкого трения [5].

Неоднородность переменного поля усиливает процессы ориентации магнитных моментов агрегатов в направлении индукции поля [10], что приводит к возникновению упорядоченного движения порошка в этом направлении. Однако при дальнейшем повышении градиента индукции структура ферромагнитного порошка меняется — она представляет собой агрегаты вытянутой формы с преимущественной ориентацией магнитных моментов вдоль силовых линий поля (магнитные струны). Магнитокипение порошка будет устойчивым, если удельная энергия диссипации станет равной удельной энергии, подводимой от переменного поля. Отсюда следует наличие оптимальных масс насыпок при заданных условиях, а также возможность срыва магнитокипения при больших массах. Увеличение размеров агрегатов приводит к снижению граничного значения градиента индукции переменного поля, соответствующего кажущемуся переходу в порошке к вязкому трению. Это совпадает с выводами, следующими из анализа соотношения (4).

Области применения. Следует отметить возможные области применения продуктов сепарации шлифовального шлама [11]:

- 1) сырьё для порошковой металлургии,
- 2) использование металлической части шлама в качестве наполнителя,
- 3) производство окатышей для металлургического производства,
- 4) в электрометаллургическом производстве,
- 5) в промышленных строительных материалах (производство керамзита),
- 6) производство пористых изделий методами конденсаторной сварки,
- 7) производство монолитных изделий методами высокотемпературной гидроэкструзии,
- 8) производство монолитных изделий с использованием энергии взрыва,
- 9) в качестве добавки при производстве наплавочных электродов,
- 10) использование электрокорунда в качестве возврата для производства абразивного инструмента и как антипригарное облицовочное покрытие в литейном производстве.

Восстановленный из шлифовального шлама абразив может применяться в литейном производстве в качестве огнеупорного облицовочного материала одноразовых форм для литья по выплавляемым моделям [12]. Проведённые исследования показали, что использование в этом случае электрокорунда, полученного сепарацией шлифовального шлама, не ухудшает качество отливок. Следовательно, он может заменить собой дорогостоящий абразив.

Для исследования влияния сепарированной стали ШХ15 на свойства наплавленного металла была изготовлена партия сварочных электродов УОНИ-13/55. Их исследование показало, что применение в составе покрытия электродов стального порошка, полученного сепарацией шлифовального шлама стали марки ШХ15, повышает пластические свойства наплавленного металла.

Выводы.

1. Предложена последовательность операций технологического процесса сепарации шламов шлифовального производства в неоднородном магнитном поле, позволяющая получать продукты переработки высокого качества.

2. Разработана конструкция блока разделения магнитной и немагнитной фракций, а также приведены основные элементы магнитовибрационного сепаратора.

3. Разработана методика выбора оптимальных режимов электромагнитного поля, обеспечивающих интенсификацию процесса разрушения агломератов шлама и, как следствие, повышение качества продуктов сепарации. Расчётная модель позволяет определить интервал градиента индукции магнитного поля, при котором происходит разрушение конгломерата шлифовального шлама.

4. Металлическая составляющая шлама использована в качестве компонента обмазки высококачественных электродов УОНИ-13/55 для дуговой сварки. Абразив, полученный из шлама шлифовального производства, использован в качестве облицовочного материала форм для литья по выплавляемым моделям.

Библиографический список

1. Кипарисов, С. С. Проблемы получения порошков и изделий из них с использованием в качестве сырья стружковых отходов / С. С. Кипарисов, О. В. Падалко // Порошковая металлургия. — 1979. — № 9. — С. 56–65.
2. Порошковая металлургия / ВИНТИ. — Москва : ВИНТИ, 1983. — Т. 1. — С. 35–39. — (Итоги науки и техники).
3. Pelletising waste materials: патент 2042376 (Англия) В22Г 9/00 / Haspel D. W.; British Steel Corp.
4. Procédé de recuperation et composants des bouers d'opérations de rectification et dispositif de mis et oeuvre: заявка 2419318 (Франция) В08В 11/00 / Centro Ricerche Fiat SpA.
5. Членов, В. А. Виброкипящий слой / В. А. Членов, Н. В. Михайлов. — Москва : Наука, 1972. — 146 с.

6. Свиридов, М. М. Текучесть сыпучего материала / М. М. Свиридов, В. П. Таров, И. Н. Шубин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 1999. — Т. 5, № 4. — С. 55.
7. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. — Москва : Машиностроение, 1973. — 216 с.
8. Вернигоров, Ю. М. Магнитовибрационная технология производства порошковых магнитов : дис. ... д-ра техн. наук / Ю. М. Вернигоров. — Ростов-на-Дону, 1995. — С. 69.
9. Генкин, В. А. Исследование спечённого фрикционного материала на основе порошка подшипниковой стали / В. А. Генкин, В. Н. Гурленя, А. А. Дмитриевич // Порошковая металлургия. — 1982. — № 6. — С. 58–61.
10. Болога, М. К. Некоторые особенности магнитооживления дисперсных систем / М. К. Болога, С. В. Сюткин // Магнитная гидродинамика. — 1981. — № 4. — С. 3–4.
11. Плотников, Д. М. Повышение качества изделий из порошковых материалов за счёт использования магнитовибрационной технологии сепарации шлифовальных шламов подшипникового производства : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. М. Плотников. — Новочеркасск, 2009. — С. 4–7.
12. Вернигоров, Ю. М. Применение электрокорунда, полученного магнитовибрационной сепарацией шлама шлифовального производства / Ю. М. Вернигоров, Д. М. Плотников // Мат-лы V Междунар. конф. по высоким технологиям и фундаментальным исследованиям. — Харьков, 2008. — С. 42–47.

Материал поступил в редакцию 06.06.2012.

References

1. Kiparisov, S.S., Padalko, O.V. *Problemy polucheniya poroshkov i izdeliy iz nikh s ispolzovaniyem v kachestve syrya struzhkovykh otkhodov*. [Problems of powder and powder products formation using chip waste as raw stock.] *Poroshkovaya metallurgiya*, 1979, no. 9, pp. 56–65 (in Russian).
2. *Poroshkovaya metallurgiya*. [Powder metallurgy.] Moscow: VINITI, 1983, vol. 1, pp. 35–39 (*Itogi nauki i tekhniki*) [Science and engineering results] (in Russian).
3. Haspel D.W.; British Steel Corp. Pelletising waste materials: Patent 2042376 England V22G 9/00.
4. Centro Ricerche Fiat SpA. Procédé de recuperation et composants des bouers d'opérations de rectification et dispositif de mis et oeuvre : application 2419318, France B08B 11/00.
5. Chlenov, V.A., Mikhaylov, N.V. *Vibrokipyashchiy sloj*. [Vibrated fluidized bed.] Moscow: Nauka, 1972, 146 p. (in Russian).
6. Sviridov, M.M., Tarov, V.P., Shubin, I.N. *Tekuchest sypuhego materiala*. [Discrete material flow.] *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universita*, 1999, vol. 5, no. 4, p. 55 (in Russian).
7. Makarov, Y.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov*. [Discrete material mixers.] Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (in Russian).
8. Vernigorov, Y.M. *Magnitovibratsionnaya tekhnologiya proizvodstva poroshkovykh magnetov : dis. ... d-ra tekhn. nauk*. [Magnetovibration production engineering of powder magnets: Dr. tech. sci. diss.] Rostov-on-Don, 1995, p. 69 (in Russian).
9. Genkin, V.A., Gurlenya, V.N., Dmitrovich, A.A. *Issledovaniye spechennogo friktsionnogo materiala na osnove poroshka podshipnikovoy stali*. [Study on frictional sintered material based on bearing steel powder.] *Poroshkovaya metallurgiya*, 1982, no. 6, pp. 58–61 (in Russian).

10. Bologa, M.K., Syutkin, S.V. *Nekotoryye osobennosti magnitoozhizheniya dispersnykh sistem*. [Additional properties of dispersion systems magnetofluidization.] *Magnitnaya gidrodinamika*, 1981, no. 4, pp. 3–4 (in Russian).

11. Plotnikov, D.M. *Povysheniye kachestva izdeliy iz poroshkovykh materialov za schet ispolzovaniya magnitovibratsionnoy tekhnologii separatsii shlifovalnykh shlamov podshipnikovogo proizvodstva: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk*. [Powder products upgrading through magnetovibrating separation technology of grinding sludge of bearing manufacture: Cand. tech. sci. diss., author's abstract] Novocherkassk, 2009, pp. 4–7 (in Russian).

12. Vernigorov, Y.M., Plotnikov, D.M. *Primeneniye elektrokorunda, poluchennogo magnitovibratsionnoy separatsiyey shlama shlifovalnogo proizvodstva*. [Electrocorundum application resulted through magnetovibrating sludge separation of grinding manufacture.] *Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii po vysokim tekhnologiyam i fundamentalnym issledovaniyam*. [Proc. 5th Int. Conf. on high tech and fundamental studies.] Kharkov, 2008, pp. 42–47 (in Russian).

FEATURES OF MAGNETOVIBRATING TECHNOLOGIES OF SLIME SEPARATION IN GRINDING MANUFACTURE

Y. M. Vernigorov, D. M. Plotnikov, N. N. Frolova
(Don State Technical University)

The metal recovery goes from 0,4 up to 0,95 under the machine waste reclamation by the powder metallurgical techniques. Energy costs on the article production de-crease. Under separating the slime produced in steel parts grinding, the promising approach is the liquefaction of dispersed ferromagnetic materials in the magnet field. In the nonuniform electromagnetic field, slime conglomerates holding the abrasive are effectively failing with the result that a qualitative splitting of magnetic and nonmagnetic slime fractions is possible. The mechanism and basic blocks of the magnetovibrating technology of the swarf separation for the bearing manufacturing are described. The determination technique of the magnetic fields optimum performance, when the effective splitting of the magnetic and nonmagnetic slime fractions is conducted, is resulted. The quoted simulation model allows define a gradient interval of the variable magnetic field induction at which the grinding slime conglomerates fail. The abrasive separated from slime was used through the investment casting. The slime metal component was used in the process of electrode coating for arc welding.

Keywords: separation, grinding sludge, magnetovibrating layer, lubricant cooling liquid separation, magnetic field.