

РАСЧЕТ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ СЕПАРАТОРА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ

Загирняк М.В., д.т.н., проф., Усатюк В.М., к.т.н., доц., Подорожный С.В.
Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского
Украина, 39614, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, КДПУ, кафедра "Электрических машин и аппаратов"
тел. (05366)3-62-19, E-mail: mzagirn@polytech.poltava.ua

Представлена нова конструкція електромагнітного сепаратора для переробки металургійних шлаків на основі циліндричного висмного електромагніту та запропонована методика його оптимального проектування на базі розрахунку трьохмірного (3D) розподілення поля методом просторових інтегральних рівнянь з застосуванням модуля Radia®.

Представлена новая конструкция электромагнитного сепаратора для переработки металлургических шлаков на основе цилиндрического извлекающего электромагнита и предложена методика его оптимального проектирования на основе расчета трехмерного (3D) распределения поля методом пространственных интегральных уравнений с использованием модуля Radia®.

ВВЕДЕНИЕ

По мере роста производства черных металлов возрастает количество производимых в промышленности металлургических шлаков. Потери металла вместе со шлаком не только заметно снижают его выход, но и существенно осложняют его дальнейшую переработку. Поэтому реорганизация технологических процессов переработки металлургических шлаков с максимальным извлечением металла является одним из путей, позволяющих увеличивать выплавку металла без привлечения в металлургический цикл дополнительных материальных и сырьевых ресурсов. Не менее важным сырьевым ресурсом является минеральная составляющая шлака, из которой путем дробления получают щебень, а при обработке шлакового расплава водой получают гранулированный шлак. Оба эти компонента широко применяются в строительстве, а наличие металла сильно ухудшает их качество.

Как показывает практика, основными причинами, приводящими к низкому уровню утилизации металла из шлаков, являются малая их изученность, а также отсутствие у производителей стран СНГ специализированного магнито-сепарирующего оборудования, приспособленного к условиям шлакопереработки. Применение же для переработки металлургических шлаков устройств, предназначенных для обогащения полезных ископаемых или защиты технологического оборудования, малоэффективно из-за значительной ошлакованности скрапа (извлечение металла не превышает 30-40% от его содержания в шлаке) [1].

Из всего разнообразия выпускаемых в настоящее время сепараторов и железотделителей (шквивные, барабанные, подвесные и т.п.), наиболее оптимальной по многим критериям как при встраивании в уже имеющиеся технологические схемы шлакопереработки, так и при разработке новых, является конструкция подвесного сепаратора. Эта конструкция является наиболее универсальной с точки зрения возможности размещения в любом месте транспортирующего конвейера, не имеет строгих габаритных ограничений, что позволяет, с целью эффективного извлечения ферромагнитных предметов, создавать более длинную зону вдоль ленты. Дополнительным достоинством подвес-

ных сепараторов является также удаление ферромагнитных тел из потока материала без захвата немагнитной его фракции. Проведенный анализ конструкций этих сепараторов свидетельствует о том, что работы по созданию и совершенствованию рассматриваемых сепарирующих устройств в мире направлены на:

- повышение эффективности извлечения за счет усиления магнитного поля и времени его воздействия на сепарируемый материал;
- повышение надежности разгрузки извлеченных тел при минимуме захвата немагнитного материала;
- снижение материал- и энергоемкости.

Это достигается как совершенствованием методик проектирования традиционных конструкций, так и разработкой новых электромагнитных систем сепараторов.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью представленной работы была разработка новой конструкции подвесного электромагнитного сепаратора, обеспечивающего более эффективное извлечение металла из шлака, а также разработка методики его оптимального проектирования на основе расчета трехмерного (3D) распределения поля.

КОНСТРУКЦИЯ ПОДВЕСНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ

С учетом результатов проведенного анализа для решения данной задачи была предложена конструкция подвесного сепаратора на основе цилиндрического извлекающего электромагнита, удовлетворяющая условиям переработки большинства металлургических и сталелитейных шлаков (рис. 1).

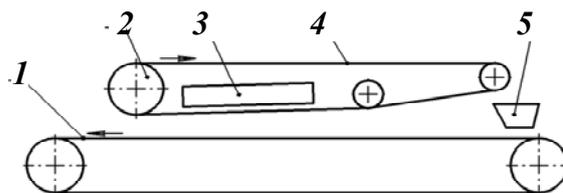


Рис. 1. Подвесной сепаратор для извлечения металла из шлака: 1 – питающий ленточный конвейер, 2 – разгружающий электромагнитный шкив, 3 – извлекающий цилиндрический электромагнит с немагнитной вставкой, 4 – разгружающая лента, 5 – приемник извлеченного металла

- Основными особенностями конструкции являются:
- верхняя разгрузка сепаратора;
 - применение в качестве извлекающего электромагнита сепаратора типичного цилиндрического грузоподъемного электромагнита (электромагнитной шайбы);
 - использование немагнитной вставки в наружном кольцевом полюсе извлекающего электромагнита.

Применение в сепараторе верхней разгрузки позволяет использовать более эффективную схему его монтажа – вдоль ленты основного питающего конвейера.

Для пояснения взаимодействия конструктивных частей сепаратора рассмотрим процесс сепарации.

При движении конвейерной ленты 1 в направлении стрелки сепарируемый шлак поступает в рабочую зону сепаратора. Здесь под воздействием магнитного поля, создаваемого цилиндрическим электромагнитом 3 ферромагнитные включения, находящиеся в толще шлака, извлекаются и прижимаются к поверхности разгружающей ленты 4. Далее при движении совместно с разгружающей лентой 4 извлеченные ферромагнитные включения поступают в поле действия электромагнитного шкива 2, с помощью которого удерживаются при переходе на верхнюю поверхность разгружающей ленты 4, где и разгружаются в металлоприемник 5.

Несмотря на использование в конструкции сепаратора хорошо себя зарекомендовавшей схемы "извлекающий электромагнит – транспортирующий электромагнит" эффективность разгрузки была низкой ввиду неустойчивой передачи извлеченного металла от более сильного извлекающего электромагнита 3 к менее сильному разгружающему шкиву 2.

Для улучшения условий такой передачи было предложено кольцевой полюс извлекающего цилиндрического электромагнита выполнить с немагнитной вставкой на стороне, обращенной к шкиву (рис. 2).

Такая конструкция кольцевого полюса способствует также уменьшению эффекта шунтирования магнитного поля разгружающего электромагнитного шкива полем извлекающего электромагнита. Данная конструкция сепаратора защищена патентом Украины [2].

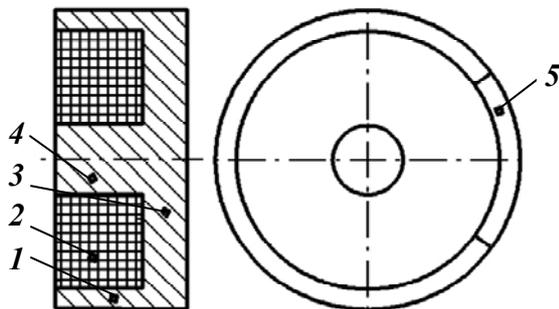


Рис. 2. Цилиндрический электромагнит с немагнитной вставкой: 1 – наружный кольцевой полюс; 2 – намагничивающая катушка; 3 – ярмо; 4 – сердечник; 5 – немагнитная вставка

РАСЧЕТНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗВЛЕКАЮЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Априори извлекающий электромагнит сепаратора должен обеспечивать большую глубину и надежность извлечения по всей ширине ленты питающего

конвейера. Для обеспечения этого с учетом технологических особенностей применения и широкого размерного ряда шлаковых сепараторов методика проектирования должна учитывать множество параметров, таких как: высота подвеса сепаратора, гранулометрический состав и плотность сепарируемого шлака, диапазон размеров ферромагнитных включений, и т.п.. Однако, до настоящего времени цилиндрические электромагнитные системы с открытым рабочим полем исследованы мало, и практически отсутствует информация для их расчета и оптимального проектирования, а подобные системы с вырезом не были исследованы вовсе.

Поэтому актуальной задачей является разработка методики расчета рациональных параметров цилиндрической электромагнитной системы с открытым рабочим полем, которая позволяла бы получать основные геометрические размеры магнитопровода и намагничивающей обмотки, а также значения ее электрических параметров с наименьшими ресурсными и временными затратами.

В качестве основного расчетного метода при математическом моделировании (рис. 3) был использован метод пространственных интегральных уравнений (ПриУ), как такой, который не требует никаких дополнительных краевых условий и базируется лишь на общем интегральном выражении напряженности поля через намагниченность деталей магнитной системы [3].

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \left[\int_V \frac{(\nabla \vec{M}) \vec{r}_{QM}}{r_{QM}^3} dV - \int_S \frac{(\vec{n} \vec{M}) \vec{r}_{QM}}{r_{QM}^3} dS \right] + \frac{1}{4\pi} \int_{V_p} \frac{(\vec{J}) \vec{r}_{QP}}{r_{QP}^3} dV_p \quad (1)$$

где \vec{H} – напряженность магнитного поля в точке наблюдения; \vec{r}_{QM} – радиус-вектор, соединяющий точку наблюдения Q с текущей точкой интегрирования по стали магнитопровода M ; \vec{r}_{QM} – радиус-вектор, соединяющий точку наблюдения Q с текущей точкой интегрирования по катушке намагничивания P ; V, S – соответственно объем и поверхность всех ферромагнитных элементов магнитной системы; V_p – объем катушки намагничивания; \vec{J} – вектор тока катушки намагничивания; \vec{n} – внешняя нормаль к поверхности S в точке интегрирования (рис. 3).

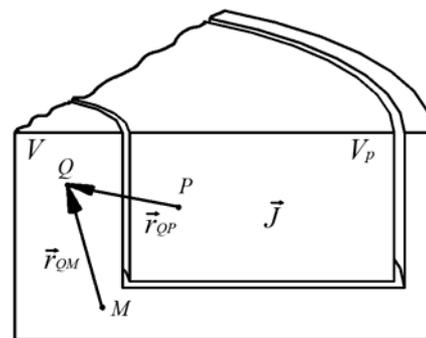


Рис. 3. Математическая модель магнитной системы

Решение данного интегрального уравнения получают приближенными численными методами. Для этого область интегрирования разбивают на конечное число элементов и заменяют интеграл его приближенным значением в виде конечной суммы. Тем самым интегральное уравнение сводится к системе нелинейных алгебраических уравнений. Решая полученную систему, находят распределение намагниченности элементов, после чего вычисляют напряженность магнитного поля в требуемых точках.

В качестве инструментария для построения трехмерной (3D) модели магнитной системы извлекающего электромагнита, из всего разнообразия систем реализующих метод пространственных интегральных уравнений, использовался модуль Radia® (European Synchrotron Radiation Facility), интегрируемый в систему Mathematica® компании Wolfram Research. Такой выбор обосновывается тем фактом, что модуль Radia® оптимизирован для трехмерных (3D) магнитоэлектростатических расчетов больших электромагнитов с открытыми магнитными полями [4] и позволяет получать для данного класса задач более точные результаты за меньшее время при использовании аналогичных расчетных ресурсов.

Порядок работы с модулем Radia®, аналогичен порядку работы в большинстве систем, реализующих методы конечных и граничных элементов, и состоит из следующих этапов: построение моделей конструктивных элементов магнитопровода и намагничивающей катушки, задание свойств областей модели, расчет и вывод результатов расчета [4].

Разработка дискретной математической модели магнитопровода в модуле Radia® заключается в правильном разбиении его на отдельные геометрические части и составлении для каждой из них математического описания. В свою очередь каждая такая часть строится из набора отдельных элементов, представляющих собой, как правило, треугольные или четырехугольные призмы. Для построения математического описания геометрии магнитопровода используются функции из группы "Field Sources" модуля Radia®.

Исходя из конструкции магнитопровода его целесообразно разбить, при моделировании, на: сердечник, ярмо и полюс. В свою очередь для повышения точности расчета ярмо разбивалось на три части (рис. 4). При этом для частей 1 и 3 ярма, с учетом переменного направления потока в них, применялась эллиптическая разбивка на элементы (согласно направлению потока).

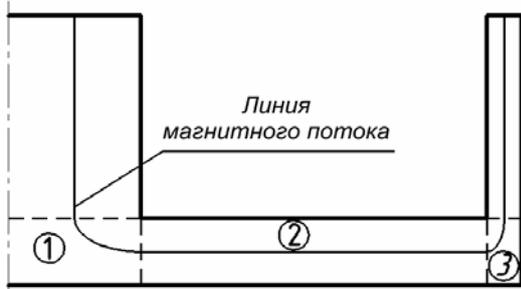


Рис. 4. Разбивка ярма на участки

Магнитные свойства материала магнитопровода задавались таблично в виде нелинейной зависимости

$B = f(H) - H = \mu_0 \cdot 102B(9.95 + B^8)$ [5], соответствующей кривой намагничивания литейной стали 15Л, из которой выполнен магнитопровод (группа функций "Magnetic Materials" модуля Radia®).

После построения математического описания всех геометрических частей магнитопровода они были объединены в единый расчетный контейнер (рис. 5).

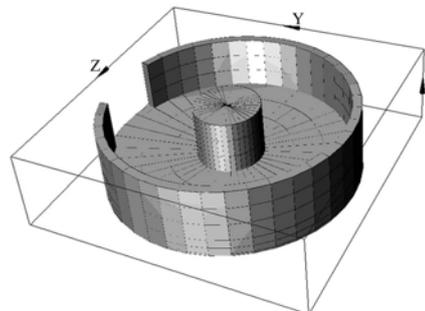


Рис. 5. Модель магнитопровода с сегментарным вырезом кольцевого полюса

Модель катушки намагничивания строится аналогично, путем задания ее геометрических размеров при помощи специальной функции из группы "Field Sources". В качестве свойств катушки намагничивания задавались магнитная проницаемость материала катушки и объемная плотность тока (соответствующая магнитодвижущей силе катушки в 9000 А).

Полное трехмерное (3D) представление построенной дискретной математической модели цилиндрического извлекающего электромагнита с открытой рабочей зоной показано на рис. 6.

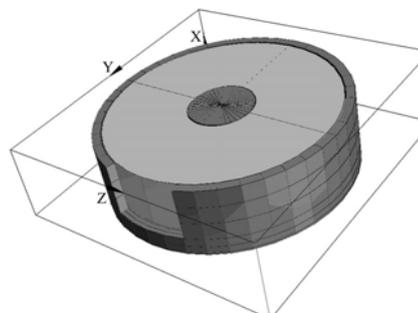


Рис. 6. Дискретная математическая модель цилиндрического извлекающего электромагнита

Расчет в модуле Radia® построенной дискретной математической модели магнитной системы не представляет сложности и выполняется функциями расчета поля "Field Computation". Параметрами функций этой группы являются параметры, ограничивающие время расчета (максимальное число итераций) и определяющие точность σ расчета. Если за принятое число итераций заданная точность расчета не достигалась, расчет прекращался, а его результаты считались недостоверными. Для расчета принимались следующие значения этих параметров: число итераций $N = 1000$, точность расчета $\sigma = 0.000001$.

Расчет интегральных показателей проводился над характерными точками, расположенными на осевом сечении магнитной системы, изображенными на рис. 7 на расстоянии от поверхности магнитной системы $L = 5 - 90$ мм с дискретностью 5 мм.

Магнитная индукция в рабочей зоне магнитной системы, рассчитанная в модуле Radia®

№ т-ки	1		2		2*		3		3*		4		4*	
	Индукция, мТл B_E / B_C	$\Delta, \%$												
5	197/199,6	-1,3	300/298,4	0,5	305/308,5	-1,1	77/81,7	-5,8	85/90	-5,6	27/28,9	-6,6	57/62,5	-8,8
10	182/185,3	-1,8	200/203,4	-1,7	218/205	6,3	73/77,7	-6	80/82,2	-2,7	25/27	-7,4	43/45,8	-6,1
15	171/172,6	-0,9	170/165,3	2,8	178/166,5	6,9	67/71	-5,6	75/74,8	0,3	24/25,2	-4,8	34/37	-8,1
20	152/153,6	-1	140/138,2	1,3	147/139,2	5,6	61/64,6	-5,6	69/67,8	1,8	22/23,6	-6,8	28/30,5	-8,2
25	134/134,2	-0,1	118/117,4	0,5	120/118,2	1,5	56/58,7	-4,6	62/61,2	1,3	21/22,1	-5	25/26,2	-4,6
30	117/116,4	0,5	100/100,8	-0,8	102/101,5	0,5	50/53,1	-5,8	56/55,1	1,6	20/20,6	-2,9	22/23,2	-5,2
35	101/100,8	0,2	88/87,3	0,8	88/87,8	0,2	45/48,1	-6,4	50/49,5	1	19/19,3	-1,6	19/20,8	-8,7
40	87/87,4	-0,5	75/76	-1,3	76/76,4	-0,5	41/43,4	-5,5	45/44,5	1,1	17/18	-5,6	18/18,9	-4,8
45	75/75,9	-1,2	65/66,5	-2,3	66/66,7	-1	36/39,2	-8,2	40/40	0	16/16,8	-4,8	16/17,3	-7,5
50	66/66,3	-0,5	57/58,4	-2,4	57/58,6	-2,7	33/35,5	-7	35/36	-2,8	15/15,7	-4,5	15/15,9	-5,7
55	55/58	-5,2	48/51,5	-6,8	51/51,6	-1,2	30/32,1	-6,5	32/32,4	-1,2	14/14,7	-4,8	14/14,7	-4,8
60	50/51	-2	43/45,5	-5,5	45/45,6	-1,3	27/29,1	-7,2	28/29,3	-4,4	12,5/13,7	-8,8	13/13,6	-4,4
65	44/44,9	-2	38/40,4	-5,9	39/40,5	-3,7	24/26,4	-9,1	25/26,5	-5,7	12/12,8	-6,3	12/12,7	-5,5
70	38/39,8	-4,5	33/35,9	-8,1	35/36	-2,8	22/23,9	-7,9	23/24	-4,2	11/12	-8,3	11/11,8	-6,8
75	34/35,3	-3,7	30/32,1	-6,5	30/32,1	-6,5	20/21,8	-8,3	20/21,8	-8,3	11/11,2	-1,8	10/11	-9,1
80	30/31,4	-4,5	27/28,7	-5,9	28/28,7	-2,4	18/19,8	-9,1	18/19,8	-9,1	10/10,5	-4,8	10/10,3	-2,9
85	27/28,1	-3,9	24/25,8	-7	24/25,7	-6,6	17/18,1	-6,1	17/18	-5,6	9/9,8	-8,2	9/9,6	-6,3
90	24/25,1	-4,4	21/23,2	-9,5	22/23,2	-5,2	15/16,5	-9,1	15/16,4	-8,5	9/9,2	-2,2	8,5/9	-5,6

Примечание: Ввиду ограничения объема публикации, данные для точек 5L и 5R не приведены. Максимальная погрешность во всем диапазоне варирования глубины извлечения для этих точек не превышает 9,7%.

Точки 3 и 3* расположены на окружности диаметром $d_3 = D_c + d_0$, точки 4 и 4* – на окружности $d_4 = D_p + H_p$.

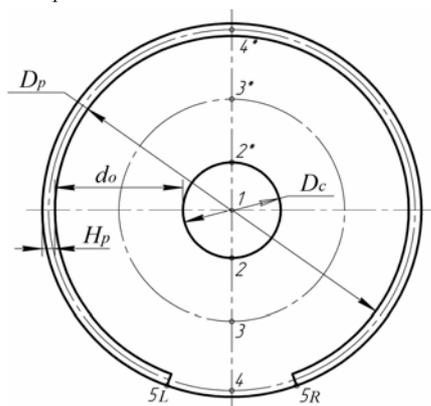


Рис. 7. Расположение характерных точек: D_c – диаметр сердечника, H_p – толщина полюса, D_p – внутренний диаметр полюса, d_0 – расстояние между сердечником и полюсом

Результаты расчета рассмотренной дискретной модели при помощи модуля Radia® в таблице, приведенной на предыдущей странице. Из представленных результатов видно, что, как и предполагалось, вырез во внешнем кольцевом полюсе существенно снижает напряженность магнитного поля в зоне передачи извлеченной фракции от извлекающего электромагнита к разгрузочному шкиву (точка 4).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Для проверки адекватности построенной дискретной математической модели цилиндрического извлекающего электромагнита с сегментарным вырезом бокового кольцевого полюса и открытой рабочей зоны были проведены экспериментальные исследования на физической модели электромагнита. Для экспериментальных исследований была разработана и изготовлена физическая модель в масштабе линейных размеров 1:5. Детали магнитопровода модели изготавливались из магнитомягкой отожженной стали, близкой по магнитным свойствам литейной стали 15Л, используемой при промышленном изготовлении магнитопроводов сепараторов. Поверхности взаимного прилегания сердечника, ярма и кольцевого полюса выполнялись с высокой степенью точности и чистоты поверхности для обеспечения минимальных зазоров между элементами магнитопровода.

Намагничивающая катушка физической модели изготавливалась без каркаса из провода марки ПЭВ–2 и изолировалась киперной лентой с пропиткой лаком и последующим запеканием. Для обеспечения необходимых намагничивающих сил во всех режимах магнитной нагрузки сепаратора, катушка выполнялась сплошной до заполнения межполюсного окна (аналогично расчетной математической модели).

Питание катушки физической модели осуществлялось от реостатного выпрямителя из комплекса измерительной баллистической установки БУ–3 с контролем намагничивающего тока по амперметру типа М1104 класса точности 0,2.

Индукция магнитного поля в рабочей зоне измерялась теслаамперметром Ф4354/1 (класс точности 0,5)

со щупом с поперечным сечением $4 \times 0,8$ мм. Измерения проводились для тех же точек (рис. 7), для которых был проведен расчет магнитного поля, и при токе, обеспечивающем МДС катушки намагничивания 9000А.

Результаты эксперимента приведены в таблице.

Оценка точности вычислений определялась путем сравнения результатов, полученных экспериментальным путем, с результатами, полученными при вычислении в модуле Radia®. Погрешность определялась по формуле

$$\Delta = \frac{B_E - B_C}{B_E} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где B_E – значение индукции магнитного поля, полученное экспериментальным путем, B_C – значение индукции магнитного поля, полученное в результате расчета. Результаты вычислений погрешностей расчета также приведены в таблице.

ВЫВОДЫ

1. Разработанный подвесной электромагнитный сепаратор при его применении в комплексах по переработке металлургических шлаков позволит повысить степень очистки минеральной составляющей от металлических включений, что повысит качество изготавливаемых из нее строительных материалов, а также увеличит выход годного металла.

2. Как показали результаты расчетов с использованием модуля Radia®, получаемая относительная погрешность не превышает 10 %, что является достаточным для проектирования и поиска рациональных размеров новых магнитных систем. Таким образом, модуль Radia® является приемлемым для выполнения трехмерных (3D) расчетов подобных магнитных систем и его применение позволяет существенно сократить необходимые ресурсы и время на проектирование новых достаточно сложных магнитных систем, а также сравнительно просто проводить их оптимизацию.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Брызгунов К.А., Гаврилова О.Н. Металлургические шлаки Донбасса. – Донецк: Донбасс, 1989. – 80 с.
- [2] Загірняк М.В., Власов В.М., Кузнецов М.І., Подорожний С.В. Деклараційний патент на корисну модель "Пристрій підвісного електромагнітного залізодокремлювача".
- [3] K.J. Binns, P.J. Lawrenson, C.W. Trowbridge, The Analytical and Numerical Solution of Electric and Magnetic Fields, John Wiley & Sons Publishers, 1992, ISBN 0-471-92460-1, 486 p.
- [4] Radia documentation Reference Guides and samples. <http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia/Documentation>
- [5] Загірняк М.В. Дослідження, розрахунк та удосконалення шківних магнітних сепараторів: Монографія. – К.: ІЗМН, 1996. – 488 с.

Поступила 22.05.2007