

частицы.

Вопрос о применимости формулы (3), полученной для ферровключений-шаров, к ферровключениям неправильной формы заслуживает особого внимания.

В качестве исследуемых ферровключений неправильной формы выбраны болт и гайка, их эквивалентные диаметры составляли соответственно 7,7 мм и 7,2 мм. Выбор именно таких ферротел не случаен: подобные ферровключения нередко встречаются в составе уловленных магнитным сепаратором феррочастиц – как элементов и фрагментов крепежа после проведения ремонтных работ оборудования.

Результаты измерений магнитной силы притяжения таких ферротел, как болт и гайка, в пороговой зоне показали, что в наиболее интересующей нас пороговой (высокоградиентной) зоне зависимости B от x , сохраняясь традиционно сходными с соответствующими зависимостями для шаров, тем не менее, располагаются выше модельных зависимостей, отличаясь от них примерно одинаковым коэффициентом $k_f \cong 1,1-1,2$.

Следовательно, для феррочастиц несферической формы вполне применима полученная формула (3), но с учетом поправочного коэффициента-множителя $k_f \cong 1,15$:

$$F_n = A \frac{d^3}{b \cdot x^2} = 23,3 \frac{d^3}{b \cdot x^2}, \quad (4)$$

которая может использоваться для решения прямых и обратных задач магнитной сепарации.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук и их научных руководителей (МК-115.2007.08).

Выводы

Получено базовое выражение для определения силы притяжения феррочастиц-шаров различных диаметров в пороговой зоне с точностью до размерного параметра. Получено базовое выражение для определения силы захвата феррочастиц несферической формы.

Характер силового фактора между противостоящими магнитами сепаратора с плоскими стержнями

Ершова В.А., д.т.н., проф. Нюнин Б.Н., к.т.н., доц. Сандуляк А.А.,
д.т.н., проф. Сандуляк А.В., Пугачева М.Н.
МГТУ «МАМИ»

На основании измерений магнитной индукции в модульном блоке, состоящем из двух противостоящих магнитов, показано, что, во-первых, индукция поля достигает своего минимального значения посередине зазора блока, и, во-вторых, с уменьшением величины самого зазора общий уровень поля повышается. На основании найденных соответствующих зависимостей градиента индукции и силового фактора показано, что их хвостовые участки (порядка 23-27% от величины зазора) сходят на нет, а значения индукции на этих хвостовых участках становятся почти авто-модельными, что свидетельствует о наличии провальной зоны между противостоящими магнитами модуля. В результате анализа ферропримесей рабочих сред, как опасного фактора энергообъектов, найдена зависимость для оценки финансового эквивалента снижения риска для энергетических объектов.

В работах [1, 2] с использованием модульного блока, т.е. двух противостоящих (в опытах – параллельно смещаемых относительно друг друга) магнитов проведена оценка характера изменения этой индукции B между ними по мере перемещения измерительного датчика (Холла) вдоль нормального к поверхностям магнитов направления x . При этом были получены экстремальные характеристики B (с минимумом посередине зазора и максимумом на поверхности магнитов), а для случая взаимного сближения противостоящих магнитных элементов отмечены их некоторое сглаживание и рост общего уровня B (за счет суперпозиции полей этих элементов).

Однако индукция B (или напряженность $H = B/\mu_0$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная

проницаемость вакуума, а $\mu = 1$ – относительная магнитная проницаемость среды-зазора) является лишь одним из параметров, от величины которого зависит сила магнитного захвата феррочастицы, проходящей между противостоящими магнитными элементами.

Вторым, не менее важным, зависимым и по сути – производным от B (или H) – параметром является неоднородность поля в той или иной точке рабочего зазора; в количественном представлении – это $dB/dx = \text{grad}B$ или $dH/dx = \text{grad}H$.

Об этом свидетельствует, например, выражение для магнитной силы захвата, действующей, в частности, даже на «точечную» (не вносящую возмущение в поле) феррочастицу с магнитной восприимчивостью χ и объемом w :

$$F = \mu_0 \chi \cdot w \cdot H \cdot \text{grad}H = \chi \cdot w \cdot B \cdot \text{grad}B / \mu_0 \quad (1)$$

Из этого выражения видно, что с точки зрения силового воздействия на феррочастицу оба из обсуждаемых здесь параметров – и H (или B), и $\text{grad}H$ (или $\text{grad}B$) – принципиально важны. А наиболее объективным параметром является их произведение: $H \cdot \text{grad}H$ или $B \cdot \text{grad}B$, зачастую называемое магнитным силовым фактором.

В значимости же фактора неоднородности поля как одного из сомножителей более общего силового фактора трудно усомниться. Так, в случае, если $\text{grad}H \rightarrow 0$ (при создании однородного поля), то величина $H \cdot \text{grad}H \rightarrow 0$, а значит $F \rightarrow 0$, даже при гиперзначениях H . То же касается и параметров $\text{grad}B$ и $B \cdot \text{grad}B$: если $\text{grad}B \rightarrow 0$, то $B \cdot \text{grad}B \rightarrow 0$ и, как следствие, $F \rightarrow 0$, каким бы высоким ни было значение B .

Игнорирование этого полеградиентного принципа может привести к невысокой результативности работы не только сепаратора с низкой, но и высокой интенсивностью поля.

Таким образом, применительно к сепараторам рассматриваемого типа весьма важным является вопрос, стоит ли стремиться к увеличению H или B , сближая магнитные элементы и выравнивая тем самым кривую H или B от x (делая поле в зазоре более однородным), или, наоборот, стремиться к большим перепадам H или B .

С целью получения детальной информации о характере поля между противостоящими магнитами (составляющими модульный блок сепаратора с «плоскими магнитными стержнями») были продолжены начатые ранее опыты [1, 2] по измерению магнитной индукции B в искусственно создаваемых зазорах величиной от $b = 13$ мм до $b = 33$ мм между магнитами конечных размеров. Для проведения опытов применялись широко используемые при создании магнитных сепараторов высокоэнергетичные магниты Nd-Fe-B диаметром 25 мм и толщиной 10 мм (рис. 1). При этом датчик для измерения B (датчик Холла) перемещался внутри зазора от поверхности одного из магнитных элементов вдоль «осевой» линии между магнитными элементами (рис. 1): почти от $x = 0$ до $x = b$.

Результаты измерений индукции B (в пределах полузазора – вплоть до середины зазора, когда $x = b/2$) приведены на рис. 1 а (при $x > b/2$ характер изменения B оставался таким же, но зеркально симметричным).

Из полученных результатов следуют, прежде всего, два очевидных и уже отмечаемых ранее [1] обстоятельства.

Первое: по мере удаления x от поверхности одного из магнитов индукция поля B убывает, достигая своего минимального значения, естественно, посередине зазора.

Второе: с уменьшением величины самого зазора b несколько повышается общий уровень поля в зазоре за счет усиливающейся суперпозиции полей противостоящих магнитных элементов. Одновременно несколько сглаживается перепад между максимальным (у поверхности магнита) и минимальным (в центре зазора) значениями индукции. По сути, происходит некоторое «выравнивание» поля, уменьшение степени его неоднородности (в идеале, при достаточно малом зазоре и сравнительно большой площади полюсов это поле было бы однородным и весьма интенсивным).

Последнее обстоятельство, как это вытекает из сделанного выше анализа, не лучшим образом сказывается на значениях градиента индукции $\text{grad}B$ и силового фактора $B \cdot \text{grad}B$.

Такая качественная оценка подтверждается соответствующими количественными данными: на основании тех же первичных (заметим – нелинейных) зависимостей B от x

(рис. 1 а). При этом можно даже не прибегать к, казалось бы, вынужденному их графическому дифференцированию – для нахождения и последующего анализа, крайне необходимых здесь зависимостей dB/dx от x .

Оказывается, что для проведения исчерпывающего анализа вполне достаточно нелинейные зависимости B от x (рис. 1 а) представить в полулогарифмических координатах (рис. 1 б). В этих координатах значительная часть каждой из зависимостей B от x хорошо линейаризуется, подчиняясь тем самым экспоненциальному закону:

$$B = 0,4 \exp(-a \cdot x) = 0,4 \exp(-0,004b \cdot x), \quad (2)$$

причем фигурирующий здесь индивидуальный коэффициент a (по сути характеризующий величину «наклона» зависимостей B от x на рис. 1 б) имеет линейную связь с таким геометрическим параметром модуля, как расстояние между поверхностями магнитов b (рис. 2), а именно $a = 0,004b$.

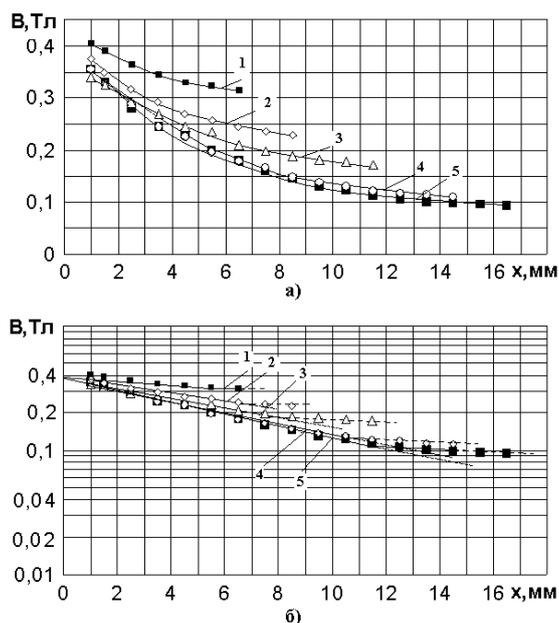


Рис. 1. Характер изменения (в пределах полузазора) магнитной индукции в обычных (а) и логарифмических (б) координатах – по мере удаления от центра поверхности одного из двух противостоящих магнитных элементов:

1 – $b = 13$ мм, 2 – $b = 18$ мм, 3 – $b = 23$ мм, 4 – $b = 29$ мм, 5 – $b = 33$ мм.

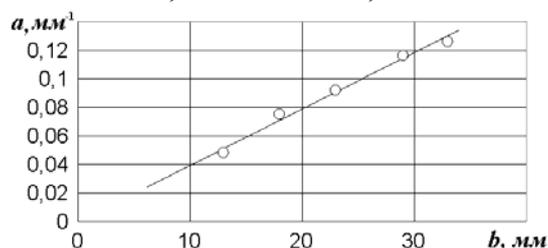


Рис. 2. Зависимость параметра a , входящего в формулу (2), от величины зазора между поверхностями магнитов (с использованием данных рис. 1 б).

Итак, в связи с нахождением ключевой функциональной зависимости (2) доступными становятся и другие интересующие нас зависимости:

$$\left| \frac{dB}{dx} \right| = |\text{grad}B| = 1,6 \cdot 10^{-3} b \cdot \exp(-0,004b \cdot x) \quad (3)$$

$$B \cdot \left| \frac{dB}{dx} \right| = B \cdot |\text{grad}B| = 0,64 \cdot 10^{-3} b \cdot \exp(-0,008b \cdot x) \quad (4)$$

Эти зависимости (отметим, что здесь, как и в предшествующей зависимости, параметры b и x – в мм) приведены на рис. 3. Видно, что «выравнивание» поля, вызываемое взаим-

ным сближением противостоящих магнитов, хотя и сопровождается общим ростом индукции B (рис. 1), тем не менее приводит к уменьшению градиента $\text{grad}B$ и силового фактора $B \cdot \text{grad}B$ поля (рис. 3). Так, по сравнению с рис. 1, на рис. 3 соответственно при $x < 7-9$ мм и $x < 5$ мм порядок расположения родственных кривых изменился даже на обратный.

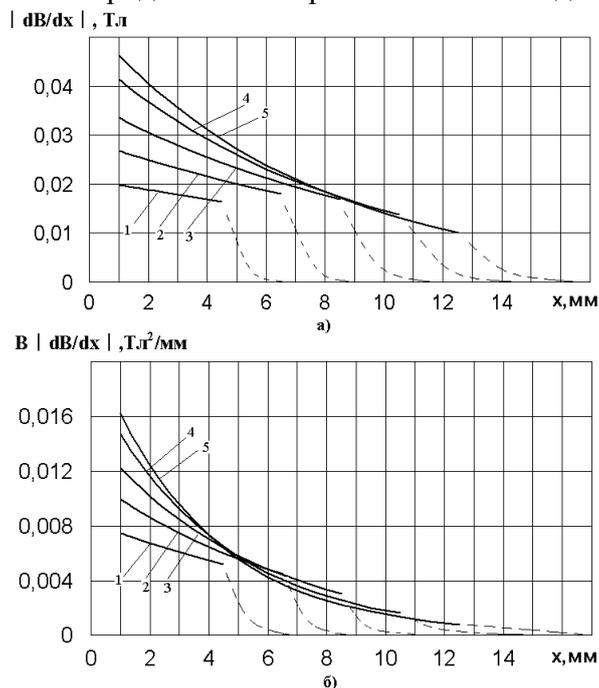


Рис. 3. Характер изменения (в пределах полузазора) градиента (а) и силового фактора (б) магнитного поля по мере удаления от центра поверхности одного из двух противостоящих магнитных элементов:

1 – $b = 13$ мм, 2 – $b = 18$ мм, 3 – $b = 23$ мм, 4 – $b = 29$ мм, 5 – $b = 33$ мм.

Таким образом, при взаимном сближении магнитных элементов, вследствие «выравнивания» поля, условия для захвата частиц (во всяком случае – «точечных», т.е. почти не искажающих воздействующее на них магнитное поле), внутри рабочей зоны ухудшаются.

Еще одной примечательной особенностью представленных на рис. 1 б зависимостей является следующее. Их хвостовые участки (порядка 23-27% от длины каждой из них (а их длина соответствует величине «своего» полузазора), будучи предэкстремальными участками зависимостей B от x , не подчиняются полученной связи (2): значения B становятся на этих хвостовых участках почти автомодельными, весьма слабо зависящими от x . Это значит, что градиент индукции, а стало быть, и силовой фактор, сходят здесь на нет (рис. 3). Следовательно, эта центральная часть зазора между противостоящими магнитами, по сути, является провальной. Ее необходимо либо дополнительно перекрывать, либо располагать под углом к направлению потока очищаемой среды (с тем, чтобы избежать «туннельного» проскока феррочастиц, снижающего эффективность работы очистного устройства).

Многочисленные примеры из энергетики и других отраслей промышленности дают основание заключить, что ферропримеси рабочих сред можно квалифицировать как опасный фактор энергообъектов.

Произведен анализ цепочки причин и следствий, приводящих к опасному температурному состоянию парогенерирующих труб котлоагрегата (вплоть до их разрывов). С учетом временных зависимостей роста массы железистоокисных отложений на парогенерирующих трубах котлоагрегатов и сверхнормативного прироста температуры металла труб, угрожающей на прочность труб, получено выражение для отношения межремонтных периодов эксплуатации парогенератора:

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{1}{(1-\psi)^{0,83}}, \quad (5)$$

т.е. периодов до (τ_1) и после ($\tau_2 = \tau_1 + \Delta\tau > \tau_1$) принятия рископонижающих мер, в частности применения магнитного очистного устройства с эффективностью работы ψ .

Значения τ_2/τ_1 и $\Delta\tau/\tau_1$, а, следовательно, и величина финансового эквивалента снижения риска ΔR (в течение годового ресурса времени $\tau_{год}$), устанавливаемая в соответствии с найденным выражением:

$$\Delta R = \left[U_1 - U_2 (1 - \psi)^{0,83} \right] \cdot N_{ОТР} \cdot \frac{\tau_{год}}{\tau_1}, \quad (6)$$

существенно возрастают при повышенных значениях ψ , где: U_1 и U_2 – ущерб (в основном, связанный с ремонтом) до и после принятия рископонижающих мер.

При этом финансовый эквивалент снижения риска для множества энергообъектов $N_{ОТР}$ оказывается на 1,5-3 порядка выше самих затрат, что стимулирует разработку и применение именно высокоэффективных очистных аппаратов, из которых действительно более предпочтительными являются магнитные, поскольку ферропримеси обладают ферромагнитными свойствами.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук и их научных руководителей (МК-115.2007.08).

Выводы

Изучен характер дистанционных зависимостей индукции, ее градиента и силового фактора между противостоящими магнитными элементами сепаратора с плоскими активными стержнями. Найденные функциональные частные и обобщающие зависимости позволили обнаружить автомодельные (провальные) участки силового фактора.

Литература

1. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Ершова В.А. Жалюзийно-магнитный сепаратор для очистки газодисперсных смесей. – Экология и промышленность России, 2006, с.26-29.
2. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Нюнин Б.Н. Магнитная очистка сырья для производства пластмассовых изделий. – Тара и упаковка, 2004, №4, с.50-51.

Исследование кинематики процесса радиального выдавливания с «бегущим» очагом деформации

д.т.н., проф. Калпин Ю.Г., к.т.н., доц. Петров П.А., Петров М.А.
МГТУ «МАМИ»

Изделия типа «стержень с утолщением» могут быть получены обработкой давлением в равной степени как в условиях, соответствующих холодной деформации, так и в условиях полугорячей либо горячей деформации. Использование поперечного выдавливания в технологии штамповки позволяет снизить энергозатраты и устранить возможность разрушения в зоне перехода от утолщения (фланца) к стержневой части изделия. Эффективность технологических процессов поперечного и комбинированного выдавливания обеспечивается, прежде всего, за счет значительного сокращения расхода металла и повышения КИМ (в 1,5–2,5 раза) и снижения трудоемкости последующей механической обработки резанием. Однако, помимо совершенствования технологии набора утолщения, остается актуальным вопрос о способе увеличения деформируемой части стержневой заготовки, а, следовательно, и увеличения конечного соотношения L/D . В статье приводятся результаты экспериментальных исследований процесса радиального выдавливания с «бегущим» очагом деформации изделия типа «стержень с утолщением». Показана принципиальная возможность получения изделий типа «стержень с утолщением» за счет комбинирования в одном инструменте двух технологических схем: высадку и поперечное (радиальное) выдавливание. Выполненные исследования позволили получить количественную оценку изменения высоты утолщения в зависимости от соотношения длины высаживаемой части изделия к ее диаметру, а также в зависимости от композиции используемой технологической смазки. Полученные данные могут быть