

2. Влияние радиуса скругления режущей кромки исследовалось при условиях:

$$\phi = 45^\circ; \phi_1 = 5^\circ; \lambda = 6^\circ; \gamma = -5.0^\circ; t = 4_{\text{мм}}; S = 0.3_{\text{мм}}; h = 0.25_{\text{мм}}; h_1 = 0.25_{\text{мм}};$$

$$r = 0.03 \dots 0.25_{\text{мм}}; \sigma = 50_{\text{кгс/мм}^2}; B = 0.43; a_n = 6.0_{\text{кг/мм}}; \mu = 0.1$$

Таблица 2

| r | θ° | q_z | J | δ | P_z | P_y | P_x | ζ_1 | β_1° |
|------|----------------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-----------|-----------------|
| 0.03 | 0.0 | 2.996 | 1.00 | 0.000 | 107.9 | 49.27 | 45.55 | 0.742 | 33.7 |
| 0.06 | 0.0 | 2.996 | 1.00 | 0.000 | 107.9 | 49.43 | 45.7 | 0.742 | 33.7 |
| 0.10 | 13.0 | 2.993 | 0.988 | 0.003 | 107.6 | 49.45 | 45.75 | 0.742 | 33.7 |
| 0.12 | 17.5 | 2.988 | 0.974 | 0.006 | 107.4 | 49.63 | 45.8 | 0.742 | 33.7 |
| 0.15 | 19.94 | 2.978 | 0.958 | 0.009 | 107.2 | 49.75 | 45.9 | 0.742 | 33.7 |
| 0.20 | 21.9 | 2.962 | 0.932 | 0.015 | 106.6 | 49.86 | 46.07 | 0.742 | 33.7 |
| 0.25 | 23.07 | 2.944 | 0.906 | 0.023 | 106.0 | 50.0 | 46.21 | 0.742 | 33.7 |

Заключение

Предложенная модель процесса резания, рассматривающая резание как совокупность двух непрерывно протекающих актов пластического деформирования упрочняемого материала: стружкообразования и выглаживания, обеспечивает аналитическое исследование косяго резания инструментом с притупленной режущей кромкой как достаточно общего случая резания.

На этой основе с использованием энергетического метода анализа выведены уравнения, необходимые для прогноза скорости схода и деформации в стружке, а также для оценки реализуемой толщины срезаемого слоя, натяга в зоне выглаживания и упрочнения приповерхностного слоя.

Выведены базовые физические уравнения для оценки давления на площадках контакта по передней и задней поверхностям инструмента с учетом контактного трения, а также всех геометрических параметров и микрогеометрии инструмента. Это позволяет рекомендовать их в качестве основы расчетных методик, используемых для проектирования технологии и конструирования нового о инструмента, в том числе с неплетачиваемыми твердосплавными пластинками.

Литература.

1. Оленин Л.Д.. Анализ механики процесса резания. 1. Стружкообразование. Известия МГТУ «МАМИ», 2008, с. 183-189.
2. Оленин Л.Д. О контактных напряжениях при внедрении плоского и скругленного пуансонов в полупространство. Материалы международного научного симпозиума. МГТУ «МАМИ», 2005г Секция 7. с. 46-52.

Характеристики зон захвата ферропримесей в магнитных очистных аппаратах

к.т.н. доц. Сандуляк А.А., Полисмакова М.Н., к.т.н. Ершова В.А., д.т.н. проф. Сандуляк А.В.,
Ершов Д.В.
МГТУ «МАМИ»

1. Решетчатый аппарат – с противостоящими магнитными элементами

Аппараты такого типа состоят из «плоских магнитных стержней», образующих своеобразную решетку-ловушку с достаточно сильным полем в рабочих зазорах (для прохождения рабочей среды) между стержнями [1-3]. Сами стержни представляют собой профильные или частично сплюснутые круглые трубки с размещенными в них постоянными магнитами, каждый из которых является источником магнитного поля. А пара противостоящих магнитных элементов, взаимопроникающие магнитные поля которых усиливают друг друга, собственно,

выступает модулем аппарата этого типа [1-3].

Первичными характеристиками такого модуля (и аппарата в целом) являются данные напряженности H или, с учетом магнитной константы μ_0 , – более часто цитируемые данные индукции $B = \mu_0 H$ в зазоре между магнитными элементами (величина B поддается простому прямому измерению, в частности, тесламетром с датчиком Холла). Для всего же рабочего зазора (того или иного размера) – это соответствующая кривая индукции, показывающая характер изменения этой индукции в пределах рабочего зазора модуля, т.е. своего рода – дистанционная (по мере удаления от контрольной точки, например, поверхности магнита, оси симметрии модуля и т.п.) кривая индукции.

Задача, связанная с созданием (и развернутой паспортизацией) аппаратов такого типа обязывает каждый раз находить индивидуальные дистанционные кривые индукции применительно к тому или иному рабочему зазору.

Решение этой задачи может быть упрощено, если, следуя общепринятому в подобных случаях подходу (например [4]), убедиться в возможности применения принципа суперпозиции к значениям напряженности магнитных полей, создаваемых обоими встречными магнитными элементами (в соответствии с классическим определением этого принципа – независимо друг от друга). Согласно этому принципу, результирующий вектор напряженности поля в определенной точке должен соответствовать векторной сумме напряженностей полей, создаваемых в этой точке каждым из источников поля. Разумеется, это относится и к индукции поля, только для среды с одинаковой относительной магнитной проницаемостью (в данном случае равной единице – для воздушного зазора).

Стало быть, с позиций этого принципа в случае использования однотипных магнитных элементов как бы вполне достаточно воспользоваться дистанционной характеристикой индукции лишь одиночного магнита. Опираясь этой характеристикой, в том числе ее «зеркальным отражением», расположенным симметрично на расстоянии, равном величине заданного зазора, можно тем самым найти дистанционную характеристику внутренней рабочей зоны модульной системы двух противостоящих магнитов.

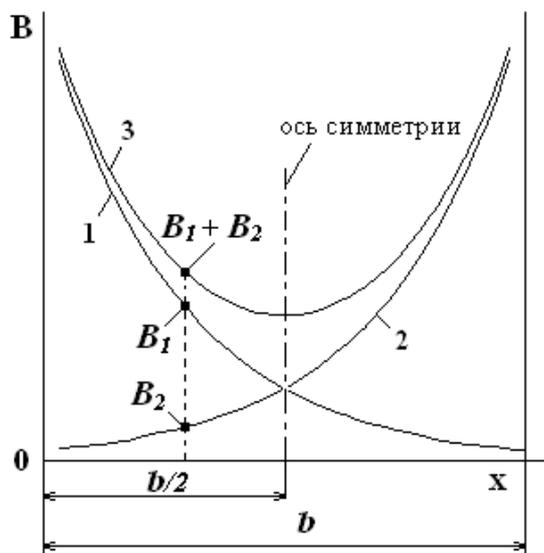


Рис. 1. Иллюстрация возможного применения принципа суперпозиции индукции для воздушного зазора шириной b между поверхностями двух противостоящих магнитных элементов, 1 – дистанционная (по мере отдаления x от поверхности одиночного магнита) кривая индукции, 2 – симметричная ей кривая индукции (ось симметрии – на расстоянии $b/2$ от поверхности одиночного магнита), 3 – кривая суперпозиции индукции (суммарная для кривых 1 и 2)

Прием использования принципа суперпозиции применительно к рассматриваемой здесь задаче наглядно иллюстрируется на рис. 1, если воспользоваться дистанционной характеристикой индукции одиночного магнитного элемента (B_1 , кривая 1), например, экспериментально полученной при удалении от поверхности магнита вдоль его оси. Тогда, располагая эту же характеристику симметрично на том или ином расстоянии b (B_2 , кривая 2), можно получить (простым алгебраическим сложением соответствующих значений B_1 и B_2) результирующую характеристику индукции B как $B = B_1 + B_2$ (кривая 3).

Получая на практике подобную результирующую характеристику индукции B (для воображаемого зазора), остается лишь сопоставить ее с фактическими данными индукции B , измеренными в реальном (эквивалентном) зазоре между противостоящими магнитными элементами. Согласие или несогласие фактических данных с данными суперпозиции и будет свидетельствовать о приемлемости или неприемлемости принципа суперпозиции применительно к рассматриваемому варианту компоновки магнитных элементов в аппарате подобного типа.

Что касается изначальной кривой, необходимой для тестирования принципа суперпозиции, а именно дистанционной кривой индукции одиночного магнита, то методически оправданным здесь является такое решение. С целью уменьшения погрешности сравниваемых затем характеристик эту кривую предпочтительно находить по усредненным данным, получаемым не для одного, а для двух (как правило, не являющихся абсолютно идентичными) одиночных магнитов [3], используемых впоследствии в модульной системе. При этом прослеживается определенная закономерность: в достаточно большом интервале дистанционного удаления x (мм) от поверхности магнитного элемента (вдоль его оси) полученная кривая индукции B (мТл) описывается аппроксимирующей экспоненциальной зависимостью [3]. В данном случае, когда использовались высокоэнергетичные магниты (Nd-Fe-B) диаметром 25 мм и толщиной 10 мм, конкретный вид этой зависимости таков:

$$B = 350 \cdot \exp(-0,11x). \quad (1)$$

Из тех же соображений саму модульную систему, состоящую из двух (этих же) магнитов, также предпочтительно характеризовать усредненными кривыми индукции, т.е. полученными для всего зазора, но приведенными к полузазору – с совмещенными симметричными ветвями.

На рис. 2 показаны соответствующие дистанционные кривые индукции, полученные приемом «мелкого шага» вдоль оси магнитов применительно к определенному зазору (фиктивному или фактическому) в практическом интервале величин этого зазора $b = (13-33)$ мм. При этом все кривые изображены здесь в рамках полузазора, что вполне достаточно для проведения необходимого анализа в соответствии с рекомендациями, изложенными в комментариях к рис. 1.

На рис. 2 видно, что кривые суперпозиции 3, полученные на основании сложения «одиночных» кривых 1 и 2, согласуются с кривыми 4, полученными для зазора между противостоящими магнитами, а это указывает на возможность (и очевидную целесообразность) практического использования принципа суперпозиции в подобных системах.

Такая же картина наблюдается и в случае измерения индукции не вдоль самой оси, а на удалении от нее – в параллельном ей направлении (рис. 3), что усиливает сделанный вывод о возможности практического использования принципа суперпозиции.

И еще одно немаловажное обстоятельство. В аппаратах рассматриваемого типа некоторые противостоящие магнитные элементы могут быть смещены друг относительно друга [1-3], как, например, в аппаратах круглого сечения, помещаемых в конические каналы и бункеры, т.е. аппаратах с разными длинами стержней-хорд.

Для выяснения возможности использования принципа суперпозиции для этого случая выполнены соответствующие измерения индукции вдоль такой «шаговой» линии, которая

параллельна осям магнитных элементов (расстояние между ними $a=R$) и равноудаленной от них на расстоянии, равном половине радиуса R магнитного элемента. Как и в предыдущих случаях (т.е. при полном теневом перекрытии противостоящих магнитных элементов), ориентация датчика Холла здесь оставалась неизменной – нормально осевому направлению магнитных элементов.

В, мТл

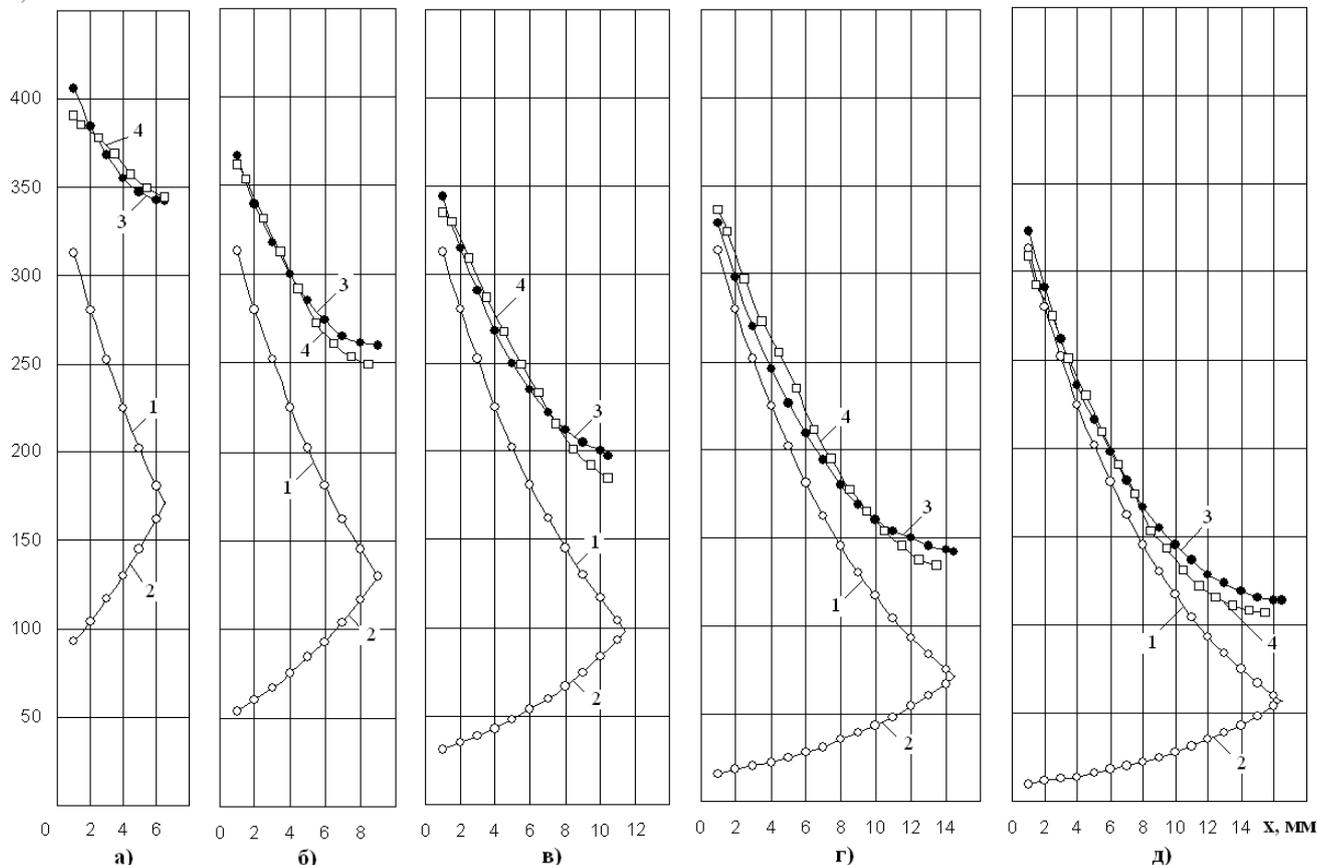


Рис. 2. Дистанционные кривые индукции в пределах полузазора $b/2$ фиктивного и фактического позиционирования магнитных элементов: 1 – для одиночного магнитного элемента (вдоль оси), 2 – то же (хвостовая часть ее симметричного изображения), 3 – результат суперпозиции (кривых 1 и 2), 4 – для модуля из двух противостоящих магнитных элементов; а) $b = 13$ мм, б) $b = 18$ мм, в) $b = 23$ мм, г) $b = 29$ мм, д) $b = 33$ мм

Измерения показали, что фактические данные индукции (рис. 4, кривая 4) и данные индукции, найденные с использованием принципа суперпозиции (рис. 4, кривая 3), согласуются лишь вблизи магнитного элемента. Именно здесь (до 20% от величины полузазора) интересующая нас магнитная силовая линия еще располагается нормально или почти нормально плоскости магнитного элемента, т.е. параллельно осевой линии. Затем, по мере удаления x от поверхности магнитного элемента, эта линия искривляется в пределах угла $0 < \beta \leq \arctg(a/b)$, все более соответствуя «углу перекося» $[\beta] = \arctg(a/b)$ самих магнитных элементов [3]. При этом сравниваемые данные индукции все более («синхронно» увеличению угла β) отличаются друг от друга (рис. 4, расходящиеся кривые 4 и 3).

Однако такое отличие фактических данных индукции (между взаимно смещенными магнитными элементами) и данных суперпозиции должно быть подвергнуто объективной корректировке – с учетом реального хода магнитной силовой линии.

Сближение сравниваемых данных достигается (рис. 4, кривая 5) при расположении датчика нормально ходу магнитной силовой линии, либо соответствующим нормированием данных индукции, получаемых при традиционном расположении датчика (нормально вы-

бранной шаговой линии). Это нормирование осуществляется делением этих данных на параметр пересчета $\cos\beta$ (заметим – с переменным углом искривления магнитной силовой линии), при этом сам ход силовых линий определяется опытным путем. В итоге находится искомое результирующее (направленное касательно магнитной силовой линии), а значит, истинное значение индукции.

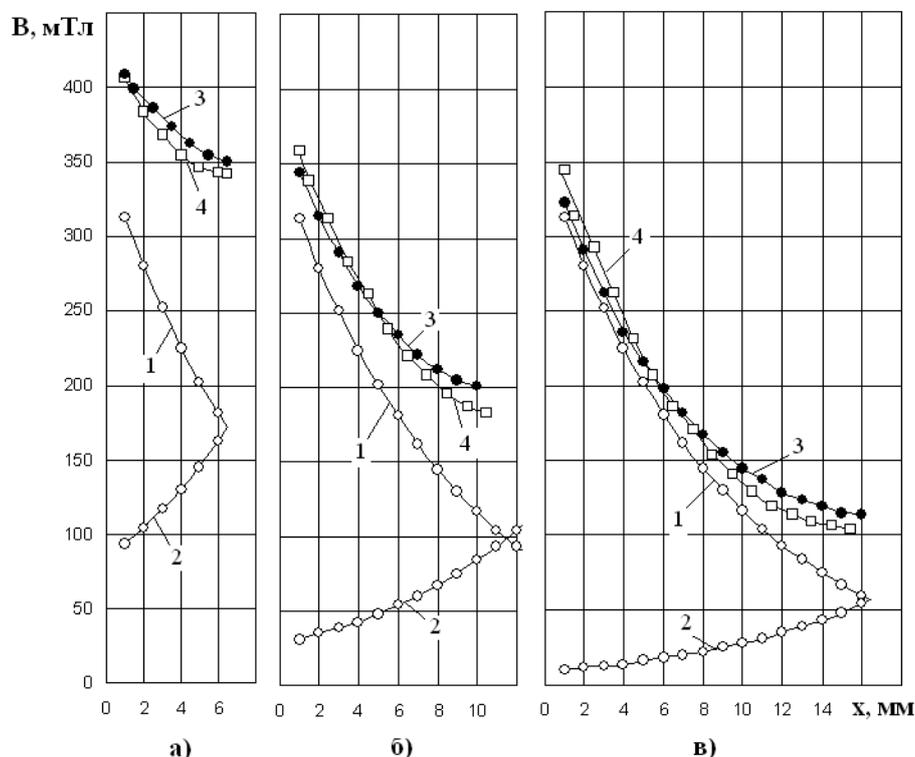


Рис. 3. Дистанционные кривые индукции в пределах полузазора $b/2$ фиктивного и фактического позиционирования магнитных элементов: 1 – для одиночного магнитного элемента (вдоль такой «шаговой» линии, которая параллельна общей оси магнитных элементов – на расстоянии, равном половине радиуса магнитного элемента), 2 – то же (хвостовая часть ее симметричного изображения), 3 – результат суперпозиции (кривых 1 и 2), 4 – для модуля из двух противостоящих магнитных элементов; а) $b = 13$ мм, б) $b = 23$ мм, в) $b = 33$ мм

Таким образом, согласие всех описанных выше кривых индукции в зазоре модуля двух противостоящих магнитных элементов с кривыми индукции, полученными исходя из принципа суперпозиции, имеется (рис. 2-4). А это свидетельствует о правомочности применения данного принципа к решению целого ряда инженерных задач, в том числе по созданию соответствующих очистных (и других) аппаратов.

Вместе с тем, вопрос об универсальной справедливости этого фундаментального принципа (в его классическом понимании, т.е. в чисто физическом смысле) применительно к «суммарному» полю, создаваемому различными источниками, на наш взгляд, все же остается дискуссионным. Действительно, этот принцип предполагает возможность сложения (в общем случае – векторного) значений напряженности (для диа- и парамагнитных сред – индукции), создаваемых каждым из источников поля независимо друг от друга.

И в самом простом случае взаимного наложения магнитных полей, а именно наложения «однаправленных» полей, справедливость этого принципа не вызывает сомнений (рис. 2 и 3).

В то же время, как это отчетливо видно на рис. 4, изображающем данные со взаимно смещенными магнитами, налагающиеся друг на друга поля здесь не ведут себя независимо друг от друга, а, судя по обобществленным (и своеобразно измененным) магнитным силовым

линиям [3], «сращиваются». При этом даже вызывает вполне очевидное затруднение ответ на вопрос о направлении каждого из изначальных векторов напряженности (индукции) поля в той или иной точке «суммарного» поля: как результата явно взаимодействующих (и изменяющих друг друга) «слагаемых» полей.

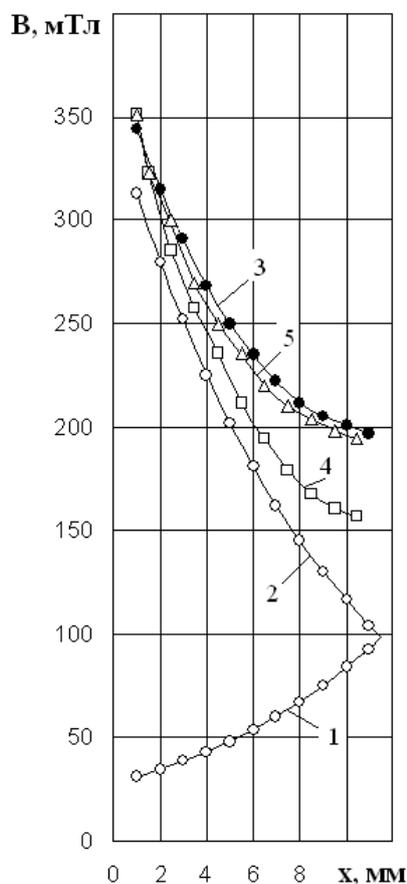


Рис. 4. Изменение магнитной индукции в радиальном направлении фильтр-матрицы (с центром на поверхности магнитного блока) в зависимости от внешнего диаметра фильтр-матрицы (диаметра корпуса D) при ее различной длине L (54-74мм):
а) $D = 74$ мм, $D = 98$ мм, $D = 120$ мм

2. Фильтр с внутренним магнитным блоком

Аппарат такого типа относится к группе так называемых магнитных фильтров, в которых в качестве рабочего органа, непосредственно контактирующего с очищаемой средой (жидкой, газообразной) используется засыпка сравнительно мелких ферромагнитных тел (например, шаров). Подвергаемая намагничиванию, такая фильтр-матрица берет на себя функцию своеобразного магнитного «поглощающего» экрана для ферропримесей очищаемой среды, так как в ее разветвленных поровых каналах формируется поле высокой напряженности и высокой степени неоднородности, что в сочетании (как силовой фактор) способствует эффективному захвату феррочастиц. И в максимальной степени это достигается, естественно, при таком позиционировании фильтр-матрицы и самой намагничивающей системы, когда обеспечивается эффективное намагничивание всего объема фильтр-матрицы.

Компоновка узлов этого аппарата такова (рис. 5), что в нем, благодаря специальному конструктивному исполнению («броневой тип», картриджный принцип) создается замкнутый магнитный контур, элементами которого являются магнитный блок с размещенными в его торцах полюсными наконечниками, а также фильтр-матрица, «опоясывающая» этот магнитный узел. При этом достигается периодический (согласно соответствующему фильтроциклу) оперативный доступ к картриджной системе аппарата, обеспечивается ее ручное изъятие (вместе с внутренним магнитным узлом). А последующее разобращение магнитного узла

с находящейся в специальном кожухе фильтр-матрицей (для прерывания воздействия на нее магнитного поля) гарантирует полное удаление образовавшегося в фильтр-матрице осадка ферропримесей и восстановление ее рабочих характеристик.

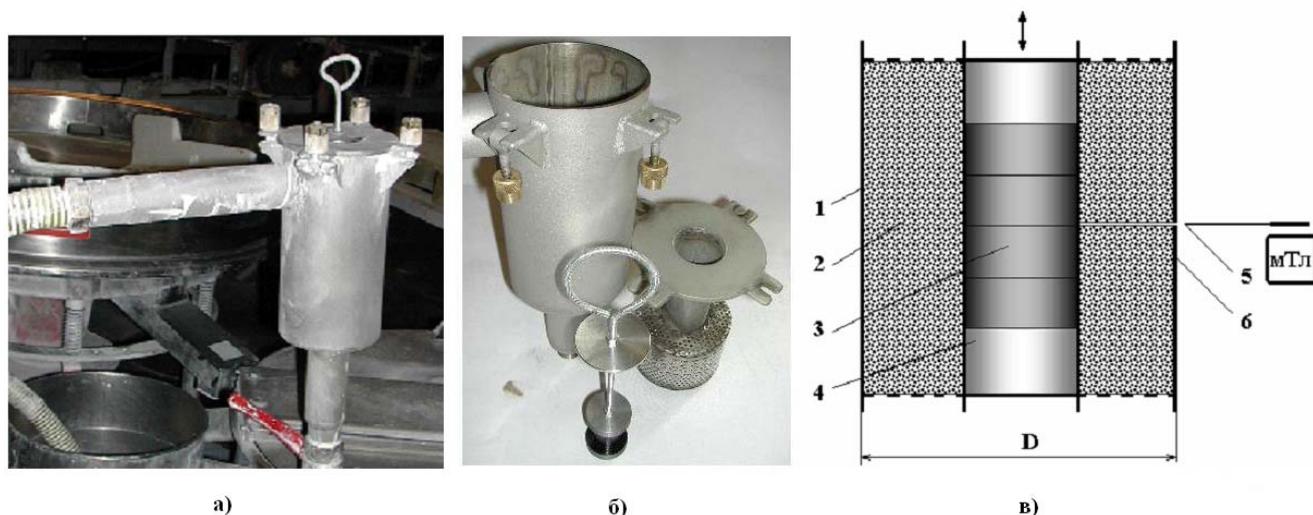


Рис. 5. Магнитный фильтр с извлекаемой (вручную) картриджной системой, состоящей из легко разобъемых основных рабочих узлов: внутреннего магнитного блока с концевыми полюсными наконечниками и «опоясывающей» этот узел фильтр-матрицы, заключенной в специальный проточный кожух; а) и б) вид аппарата в сборе и разборе, в) общая схема аппарата (с элементами модели, подвергаемой стендовым исследованиям); 1 – 30мм корпус, 2 – фильтр-матрица, 3 – блок постоянных магнитов, 4 – полюсный наконечник, 5 – щелевой зазор (для измерений индукции), 6 – измерительный датчик (Холла)

Применительно к такой конструкции практически важным является вопрос о том, каков уровень намагничивания фильтр-матрицы в «благоприятных» и «неблагоприятных» для этого зонах. Речь идет, в частности, о слоях фильтр-матрицы, находящихся вблизи магнитного блока, и о слоях, отдаленных от самого магнитного блока и его полюсных наконечников (периферийных слоях, прилегающих к корпусу аппарата). Другими словами, практический интерес представляет информация о характере «растекания» магнитного потока сквозь фильтр-матрицу.

Этот вопрос можно выяснить путем измерения средней индукции в фильтр-матрице, например, создавая в ней, как в элементе замкнутой магнитной цепи, щелевой зазор – такой, который позволил бы разместить в нем измерительный датчик. При этом, учитывая, что в данном случае приходится иметь дело не с гладкими, а состоящими из слоев шаров противоположающимися «стенками» зазора, для получения объективных (локально существенно отличающихся) данных необходимо проводить многократные замеры с последующим усреднением однотипных данных и соответствующих зависимостей.

Несомненно, в соответствии с классическим подходом в подобных случаях необходимо создавать полный зазор в элементе магнитной цепи, т.е. по всему поперечному сечению фильтр-матрицы (а не локально) – с тем, чтобы избежать фактора шунтирования магнитного потока и соответствующего занижения результатов экспериментов. Вместе с тем, как показывают результаты экспериментов (рис. 6), данные индукции в локальном (в радиальном направлении) зазоре определенной ширины, хотя и уступают аналогичным данным для полного зазора, отличаются от них с точностью до примерно постоянного коэффициента. В частности, при создании частичного зазора (в радиальном направлении) шириной 22мм (при окружной длине слоев фильтр-матрицы от 126мм до 308мм) коэффициент пересчета составляет 1,5-1,7 (в среднем 1,6). Следовательно, для оперативного получения сравнительно большого объема данных вполне можно воспользоваться частичным зазором с последующим пересче-

том этих данных путем умножения на соответствующий коэффициент.

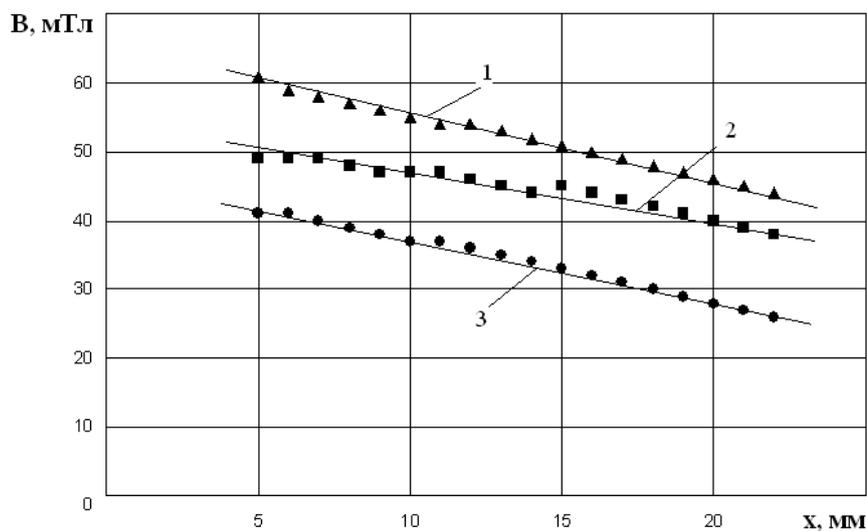


Рис. 6. Средняя магнитная индукция в фильтр-матрице аппарата – в ее радиальном направлении (с центром на поверхности магнитного блока), $D = 98$ мм, 1 – измерения в полном зазоре, 2 и 3 – измерения в зазорах шириной 32 мм и 22 мм

На рис. 7 показаны данные средней индукции поля в фильтр-матрице, полученные в ее радиальном направлении (рис. 5в) для различных значений диаметра фильтр-матрицы ($D=74-120$ мм) и ее длины (54-74 мм: равной совокупной длине магнитного блока и двух полюсных наконечников толщиной по 17 мм). Полученные данные позволяют сделать следующие заключения.

Первое. Средние значения индукции поля в фильтр-матрице (рис. 7) слабо зависят от ее длины (в принятом диапазоне изменения длины фильтр-матрицы). Это связано, очевидно, с «синхронно взаимосвязанным» изменением длины фильтр-матрицы и магнитного блока: в частности, приращение длины этого блока влечет соответствующее приращение длины фильтр-матрицы.

Второе. С увеличением диаметра фильтр-матрицы D заметно увеличивается «перепад» между средними значениями индукции поля B в фильтр-матрице, расположенной вблизи магнитного блока, и в периферийной области (рис. 7). Так, при снижении B в 1,1-1,2 раза для $D = 74$ мм уже для $D = 98$ мм это снижение составляет 1,6-1,7 раза, а для $D = 120$ мм – 2,1-2,2 раза (в последнем случае, как это очевидно, периферийные слои фильтр-матрицы находятся в заметно ухудшенных условиях намагничивания).

Третье. Если расслоением зависимостей (рис. 7), полученных для различных длин фильтр-матрицы, пренебречь, описывая их единой (для каждого из значений D) зависимостью, то реальной становится возможность обобщения всех полученных экспериментальных данных.

Так, каждая из индивидуальных (для определенного значения D) зависимостей хорошо линеаризуется в полулогарифмических координатах (рис. 7), а это указывает на ее экспоненциальный вид, т.е. функциональный вид типа $B = B_0 \cdot \exp(-k \cdot x)$. Соответствующая обработка полученных данных дает степенные выражения для начальной ординаты $B = 1100/D^{0.7}$ (рис. 8а) и параметра в экспоненте $k = 2,5 \cdot 10^{-4} D$ (рис. 8б), а в итоге – развернутое выражение для средней индукции магнитного поля (с учетом упоминавшегося выше коэффициента пересчета, равного 1,6):

$$B = \left(\frac{6600}{D^{0.7}} \right) \cdot \exp(-2,5 \cdot 10^{-4} D \cdot x), \quad (2)$$

справедливое для очистных магнитных аппаратов (фильтров) подобного типа.

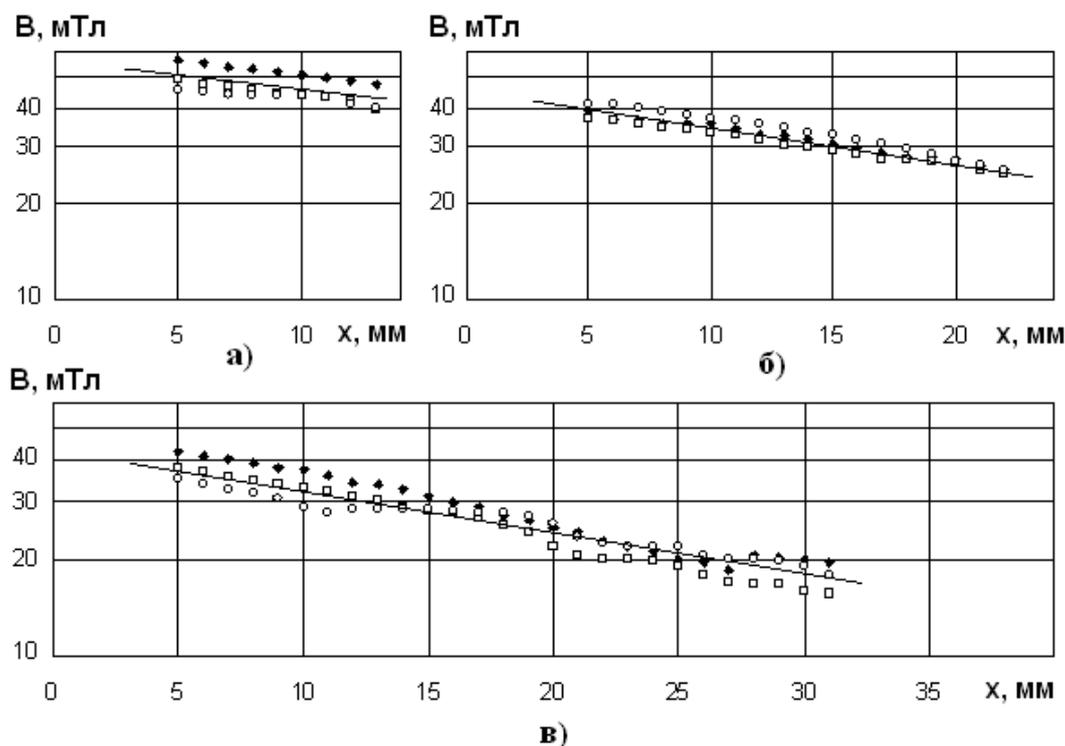


Рис. 7. Изменение магнитной индукции в радиальном направлении фильтр-матрицы (с центром на поверхности магнитного блока) в зависимости от внешнего диаметра фильтр-матрицы (диаметра корпуса D) при ее различной длине L (54-74мм):
 а) $D = 74$ мм, б) $D = 98$ мм, в) $D = 120$ мм,

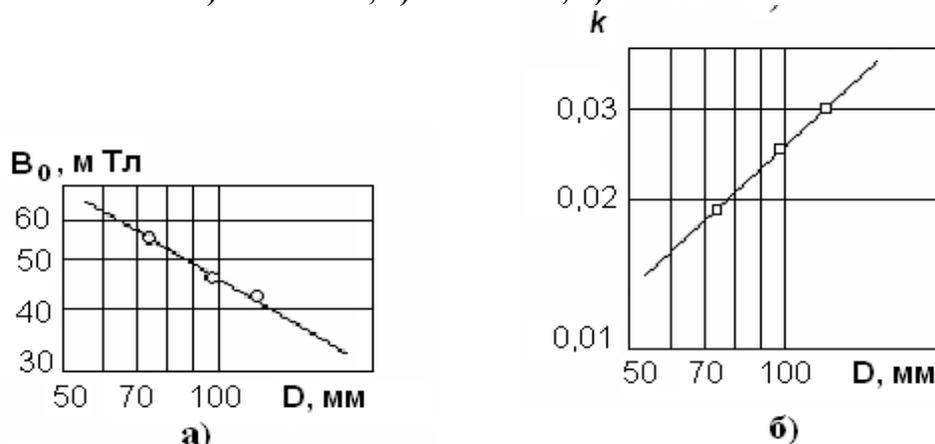


Рис. 8. К определению начальной ординаты B_0 (а) и параметра k (б) в экспоненциальном выражении для средней индукции в ферромагнитной (полишаровой) фильтр-матрице аппарата с внутренним узлом намагничивания.

Выводы

1. Для рабочих зон магнитных очистных аппаратов решетчатого типа (с противостоящими магнитными элементами, индивидуально характеризующимися экспоненциальной убывающей зависимостью индукции поля – до ее хвостовой части) вполне применим принцип суперпозиции полей – с учетом реального хода магнитных силовых линий и позиционирования измерительного датчика.

2. Для магнитных очистных аппаратов фильтрационного типа (с внутренним магнитным блоком) средняя индукция поля в фильтр-матрице, окружающей магнитный блок, убывает в радиальном направлении по экспоненциальному закону, оставаясь заметно зависимой

от диаметра аппарата.

Литература

1. Сандуляк А.А. Совершенствование режимов и систем магнитной очистки технологических сред для предупреждения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации энергетического оборудования. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук, М., 2005.
2. Ершова В.А. Исследование характеристик рабочих зон магнитных очистных аппаратов как средств предупреждения чрезвычайных ситуаций в условиях коррозии и износа оборудования. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук, М., 2007.
3. Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Пугачева М.Н., Мартынов О.В. Особенности магнитных сепараторов для очистки сырья от ферропримесей. – Хлебопродукты, 2008, № 9, с.42-43.
4. Фролов В.Н., Маслов А.Н., Кудреватых Н.В. Расчет магнитного поля в системах из постоянных магнитов и магнитно-мягких элементов. – Электротехника, 1999, № 10, с.42-43.

Метод изучения структурообразования металла с целью получения информации для управления процессом затвердевания изделий, кристаллизующихся в условиях двухфазной зоны

к.ф.-м.н. с.н.с. Сулимцев И.И.
МГТУ «МАМИ»

Формирование изделия из металлического расплава во многих технологических процессах автомобильной промышленности проходит в условиях одновременного отвода тепла и воздействия внешнего давления. При этом характерной особенностью процессов является наличие в обрабатываемом объеме областей, где одновременно существуют как твердая, так и жидкая фазы. Такое состояние называют двухфазной зоной. Конечные свойства поковки, например, существенно зависят от режима обработки двухфазной зоны при формировании поковки. Проблема управления структурообразованием кристаллизующейся в условиях двухфазной зоны поковки является многоплановой и в настоящее время интенсивно разрабатывается в различных направлениях [1].

В настоящей статье рассматривается метод изучения структурообразования в двухфазной зоне, дающий возможность прямым путем получить информацию о развитии структуры твердой части двухфазной зоны и о составе ее жидкой части (ликвата) в физически малом объеме кристаллизующейся двухфазной зоны на различных этапах затвердевания.

Еще Д.К. Черновым было установлено [2], что граница между твердой и жидкой фазами кристаллизующегося стального слитка весьма разветвлена. Последующие производственные и лабораторные исследования позволили установить, что протяженность (глубина) этой границы в типичных условиях затвердевания может составлять $10^{-2} - 10^2$ см. Область (объем) пространства, занимаемая совместно существующими твердой и жидкой фазами и отделяющая полностью затвердевший металл от расплава, и есть двухфазная зона [3, 4, 5]. По современным представлениям именно в двухфазной зоне протекают основные процессы, приводящие к образованию дендритной, зеренной и другой структуры, неметаллических включений, различных типов дефектов в конечном продукте. Типичным свойством двухфазной зоны является значительная величина межфазной поверхности.

Строение двухфазной зоны позволяет рассматривать некоторый характерный элемент (ячейку) в ней, совокупное развитие процессов кристаллизации в которых образует объем затвердевающего металла.

Рассмотрим (рис. 1) распределение температуры и концентрации в пространстве между соседними ячейками (расположенными на среднем расстоянии λ друг от друга), в которых растут дендритные кристаллы [6].

Можно считать [6], что температура T и концентрация C на поверхностях контакта кристаллов с жидкостью соответствуют равновесной диаграмме сплава. Однако внутри межкристаллитной жидкости равновесие не соблюдается. Для типичных междендритных расстояний