

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ ДЛЯ МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

В. А. ТРОИЦКИЙ, А. И. БОНДАРЕНКО, В. М. ГОРБИК

Рассмотрены особенности выбора кинематических схем портативных намагничивающих устройств для магнитной дефектоскопии, приведена классификация и описаны конструкции намагничивающих устройств на постоянных магнитах из редкоземельных металлов. Описаны особенности их применения при выполнении магнитного контроля.

Peculiarities of selection of kinematic circuits of portable magnetization devices for magnetic flaw detection have been selected, their classification is given and designs of magnetization devices using REM permanent magnets are described. Features of their application during magnetic inspection are described.

Магнитная дефектоскопия основана на обнаружении незначительных магнитных полей рассеяния, которые возникают в местах расположения поверхностных и подповерхностных дефектов объектов из ферромагнитных материалов. По типу детектора, регистрирующего магнитное поле, различают магнитопорошковый, магнитолюминесцентный, феррозондовый, магнитографический, магнитоакустический, магнитооптический, магниторезисторный и др. методы [1].

Все перечисленные методы предполагают обязательную операцию намагничивания контролируемого объекта, которая является основной при магнитной дефектоскопии и от которой в значительной степени зависит чувствительность контроля.

Одним из самых распространенных магнитных методов неразрушающего контроля (НК) является магнитопорошковый [1, 2], который применяют на различных стадиях жизненного цикла объектов: при их изготовлении, эксплуатации и ремонте. Этот метод используют при подготовке деталей и сборочных единиц к сварке, после изготовления сварных соединений, при выполнении наплавки, после устранения обнаруженных дефектов.

Магнитопорошковый метод контроля (МПК) при относительно высокой производительности отличается достаточно высокой чувствительностью и достоверностью результатов и при этом позволяет осуществлять сплошной контроль всей поверхности деталей, обеспечивает возможность контроля деталей, различных по форме и размерам, при быстром изменении режимов контроля, создает простые условия разбраковки деталей и регистрации результатов контроля.

Независимо от задач контроля эффективность метода, достоверность и вероятность обнаружения дефектов в значительной степени зависят от

совершенства намагничивающего устройства (НУ), которое является основным элементом процесса контроля.

Особенности выбора кинематических схем НУ. Среди большого разнообразия схем и технических средств для намагничивания объектов контроля особое место занимают переносные портативные НУ для полюсного намагничивания способом приложенного поля, среди которых широкое распространение получили НУ на основе электромагнитов постоянного тока и НУ на постоянных магнитах. Такие устройства обеспечивают решение задач контроля в достаточно широком диапазоне. Для контроля большого количества разнообразных по форме, размерам и магнитным свойствам изделий переносные НУ должны быть универсальны. Поэтому магнитные системы таких устройств должны содержать магнитопроводы, состоящие из нескольких звеньев, связанных между собой шарнирами. Магнитопроводы НУ должны иметь возможность изменения углов и расстояний между полюсами, что позволит устанавливать их нормально к поверхности различных по форме изделий и тем самым обеспечивать хороший контакт полюсов с изделием. Конструктивно переносные НУ могут выполняться в виде плоских механизмов, содержащих на полюсах до двух кинематических пар. Однако такие НУ позволяют выполнять перемещения полюсов только в одной плоскости, что значительно ограничивает применение указанных устройств при контроле сложных конструкций, например, сварных. Примером таких устройств может быть НУ в виде электромагнита постоянного тока типа ВММ фирмы «Tiede» (Германия) [1]. Более совершенными являются НУ, магнитопроводы которых выполнены в виде пространственных механизмов с возможностью поворота полюсов в двух плоскостях. Та-



кие устройства имеют три и более степеней подвижности. Примером таких НУ являются приставные устройства дефектоскопов МПД-70 и МД-50П в виде электромагнитов постоянного тока с тремя степенями подвижности. Однако количество степеней подвижности не всегда может служить полной характеристикой механической системы НУ. Так, в приставных электромагнитах дефектоскопов ПМД-70 и МД-50П звенья магнитопровода с катушками намагничивания на полюсах имеют ограниченный угол поворота вокруг осей вращения, что не позволяет контролировать цилиндрические поверхности с малым радиусом кривизны.

Таким образом, необходимый диапазон пространственных перемещений полюсов переносных НУ и соответствующая ему кинематическая схема накладывают существенные ограничения на выбор количества и размеров звеньев магнитопровода НУ. В то же время, как пространственные перемещения, так и размеры НУ определяются конструкцией контролируемого изделия и размерами зоны контроля. Размеры зоны контроля зависят от формы изделия, технологических особенностей МПК конкретного изделия. Важным фактором, определяющим оптимальные геометрические размеры магнитных систем портативных переносных НУ, являются параметры их электрических и магнитных цепей, а также магнитные свойства материалов контролируемых изделий.

Приведенные выше соображения относительно конструирования магнитных систем портативных переносных НУ в равной степени относятся к устройствам, создаваемым на основе электро- и постоянных магнитов. Однако НУ на основе электромагнитов имеют следующие недостатки:

для их питания необходима сеть переменного тока и соответствующий блок управления;

обмотки располагаются непосредственно на полюсах, что увеличивает массу НУ и снижает маневренность при проведении контроля;

невозможность их использования во взрыво- и пожароопасных средах, в условиях отсутствия сети переменного тока (полевые условия), а также трудность применения на строительных площадках, при проведении высотных работ, участках сборки и сварки, при контроле внутренних поверхностей емкостей, трубопроводов и т. п.;

необходимость определенных физических усилий для поддержания длинных кабелей к НУ на основе электромагнитов.

Основным преимуществом НУ на основе электромагнитов постоянного тока является возможность регулирования тока в обмотках электромагнитов и, соответственно, магнитного поля на полюсах.

НУ на постоянных магнитах. Значительным прогрессом в магнитной дефектоскопии стала раз-

работка НУ на мощных постоянных магнитах из редкоземельных металлов для полюсного намагничивания способом приложенного поля. Простейшими из них являются два магнита из магнитотвердых материалов с высокими магнитными характеристиками. Магнитотвердые материалы, из которых изготавливаются постоянные магниты, характеризуются широкой петлей гистерезиса. В настоящее время в НУ используются постоянные магниты на основе сплава неодим–железо–бор (NdFeB), остаточная магнитная индукция которых составляет порядка $B_r = 1,25$ Тл. Постоянные магниты монтируются в магнитопроводы из магнитомягких ферромагнитных материалов, которые позволяют направить магнитный поток по требуемому пути. НУ на постоянных магнитах не требуют электропитания, имеют малую массу, портативны, компактны и могут иметь весьма простое конструктивное исполнение. Регулирование магнитного поля на полюсах НУ может достигаться конструктивным путем (шунтированием магнитного потока, увеличением зазора между полюсами и поверхностью изделия). Масса и габаритные размеры меньше в 10...15 раз, чем у аналогичных электромагнитных устройств. Появление мощных постоянных магнитов открыло новые возможности в электромагнитно-акустическом УЗК, магнитографии, магнитооптическом и других видах НК.

Постоянные магниты из редкоземельных материалов в настоящее время используются при создании эффекта подмагничивания в условиях локального полюсного возбуждения магнитных полей рассеяния поверхностных слоев изделия магнитооптическим методом НК, основанным на магнитной визуализации магнитограмм [3].

В настоящее время известно множество типов НУ для порошковой дефектоскопии на постоянных магнитах, разработанных в разных странах. Определенное представление об их конструктивном разнообразии исполнений дает классификация, приведенная на рис. 1.

В основу классификации НУ на постоянных магнитах положен способ перемещения полюсов по поверхности контролируемых изделий в процессе их намагничивания при проведении контроля: переставные дискретно по контролируемым участкам изделия и передвижные непрерывно по контролируемой зоне на изделии (например, вдоль сварного соединения). При этом участок изделия, подвергаемый намагничиванию с помощью НУ на постоянных магнитах, является магнитопроводом, замыкающим полюса магнитов, в результате чего при проведении контроля создается замкнутая магнитная система.

Значительный вклад в создание НУ на постоянных магнитах внесен ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, в котором работы по разработке



Рис. 1. Классификация НУ на постоянных магнитах

и исследованию таких НУ проводятся с восьмидесятих годов прошлого столетия. Одной из первых разработок ИЭС им. Е. О. Патона было переставное НУ типа ЭМ-1 с фиксированным расстоянием между полюсами за счет соединения их жестким П-образным магнитопроводом, в котором отсутствовали какие-либо звенья для изменения углов и расстояний между полюсами. Более универсальным явилось НУ ЭМ-1м с гибким магнитопроводом между полюсами в виде тросовой перемычки. С помощью такого устройства легко реализуется способ полюсного продольного, поперечного и нормального намагничивания деталей сложной по конфигурации формы.

На рис. 2 приведен общий вид переставного НУ ЭМ-1м в процессе полюсного поперечного намагничивания детали в виде бруска с выявленной на нем продольной трещиной. Для более четкого выявления дефектов поверхность бруска покрыта белым контрастным красителем. В качестве намагничивающих элементов в устройстве ЭМ-1м используются цилиндрические постоянные магниты, которые размещаются в корпусах из немагнитных материалов. Гибкий магнитопровод позволяет осуществлять пространственное перемещение полюсов практически в трех плоскостях, что дает возможность проводить контроль изделий сложной формы и с изменением расстояния между полюсами. К аналогичному типу относятся НУ УН-5 разработки МНПО «Спектр» (Россия) [4] с прямоугольными магнитами в полюсах, «Flaw Finder» фирмы «Helling GmbH» (Германия) [5] и МД-4, МД-6 [4], полюса которых соединены гибким магнитопроводом в виде тросовой перемычки. Намагничивающее устройство МД-4 изготавливается также в модификации с тремя сте-

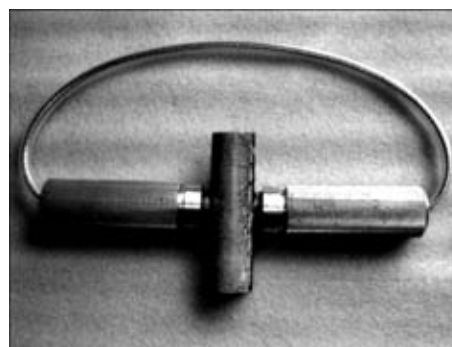


Рис. 2. Общий вид переставного НУ ЭМ-1м при МПК детали в виде бруска с выявленной на нем продольной трещиной

пенями подвижности на магнитопроводе, что позволяет осуществлять поворот полюсов в двух плоскостях. При феррозондовом методе контроля для локального намагничивания контролируемого участка сварного шва с целью обнаружения поверхностных и внутренних дефектов материала сварного соединения и околшовоной зоны используется НУ на постоянных магнитах МСН-14 с гибким магнитопроводом [6]. Технические характеристики рассмотренных НУ на постоянных магнитах с гибким магнитопроводом приведены в таблице. НУ не позволяют регулировать величину магнитного поля на полюсах. Регулирование напряженности магнитного поля при проведении МПК с помощью таких НУ проводится путем изменения расстояния между полюсами.

Дальнейшим развитием переставных НУ является разработка в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины НУ ЭМ-3, общий вид которого при МПК детали в виде фрагмента трубы приведен на рис. 3.

Конструкция НУ ЭМ-3 представляет собой симметричную магнитную систему, выполненную



Технические характеристики НУ на постоянных магнитах с гибким магнитопроводом

Технические характеристики	Типы намагничивающих устройств					
	ЭМ-1м	УН-5	МД-4К	МД-6	МСН-14	«Flaw Finder»
Длина тросовой перемычки между полюсами, мм	420	320	400	—	800	420
Расстояние между полюсами при контроле, мм	60...160	60...100	60...170	60...150	От 110 и более	60...150
Габаритные размеры полюсов, мм	∅ 32×105	150×45×25	∅ 50×50	40×40×37	∅ 69	∅ 50×150
Тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля H , А/см, в центре воздушного зазора между полюсами при межполюсном расстоянии L , мм	$H = 70$ $L = 100$	$H = 170$ $L = 95$	—	—	$H = 520$ $L = 400$	≥ 23
Усилие отрыва от ферромагнитной плиты, кг	≥ 16	—	35...40	—	—	30
Масса намагничивающего устройства, кг	0,8	1,8	2,4	1,8	2,8	1,0

в виде плоского механизма с двумя степенями подвижности полюсов, которые позволяют изменять расстояние от 10 до 110 мм между полюсами в одной плоскости. Такая кинематическая схема НУ реализует способ полюсного продольного, поперечного и нормального намагничивания. В полюса встроены поворотные механизмы, с помощью которых дискретно осуществляется регулирование магнитной индукции на полюсах от нуля до максимального значения путем шунтирования магнитного потока. Наличие режима шунтирования магнитного потока позволяет также легко снимать НУ с контролируемой ферромагнитной поверхности изделия. При максимальном значении магнитной индукции на полюсах тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля в середине воздушного зазора при межполюсном расстоянии, равном 100 мм, составляет не менее 110 А/см.

Для повышения производительности МПК в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины было разработано передвижное НУ ЭМ-2, представляющее собой симметричную магнитную систему колесного типа с кольцевыми магнитами в полюсах [7]. Общий вид НУ ЭМ-2 при МПК участка сварного соединения приведен на рис. 4. Полюсами НУ являются колеса, жестко соединенные между собой через магнитопровод. Колеса и магнитопровод выполнены из магнитомягкого материала. Для вращения магнитной системы магнитопровод НУ размещается в цилиндрической втулке из немагнитного материала. Устройство предназначено для непрерывного намагничивания плоских протяженных участков изделий из ферромагнитных материалов, расположенных в любых пространственных положениях.

Расстояние между полюсами может быть изменено за счет ферромагнитных шайб, надеваемых симметрично на ось НУ в зоне каждого кольцевого магнита. В таких НУ регулировка магнитной индукции на полюсах производится введением на пути магнитного потока неферромагнитных прокладок. При межполюсном расстоянии, рав-

ном 100 мм, тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля в середине воздушного зазора составляет не менее 160 А/см.

Для проведения магнитного контроля передвижное НУ устанавливается таким образом, чтобы ось магнитопровода располагалась перпендикулярно оси сварного шва. Перемещение НУ по контролируемой поверхности изделия осуществляется без особых усилий с помощью рукоятки оператором-дефектоскопистом, что позволяет одновременно с перемещением НУ непрерывно выполнять операцию полива контролируемой поверхности магнитной суспензией. После окончания контроля для снятия устройства с ферромагнитной поверхности рукоятку НУ необходимо повернуть вертикально относительно его оси до контакта упоров с поверхностью изделия. При дальнейшем повороте рукоятки произойдет отрыв НУ от поверхности. Отрыв с помощью упоров снижает усилие отрыва в l_1/l_2 раз, где l_1 — длина ручки НУ; l_2 — длина упоров.



Рис. 3. Общий вид переставного НУ ЭМ-13 при МПК детали в виде фрагмента трубы



Рис. 4. Общий вид передвижного НУ ЭМ-2 при МПК участка сварного соединения

Оценка качества НУ на постоянных магнитах. Независимо от типа НУ и его сложности главное внимание при их изготовлении необходимо обращать на качество НУ и применяемого магнитного индикатора (порошок, магнитографическая лента, металлическая полоса при магнитооптическом методе).

НУ на постоянных магнитах при изготовлении должны быть подвергнуты техническому диагностированию путем проверки параметров и работоспособности системы «НУ—магнитный индикатор».

Основными проверяемыми параметрами НУ на постоянных магнитах при их изготовлении являются [8]:

напряженность магнитного поля на полюсах и в воздушном зазоре между полюсами;

механическое усилие отрыва полюсов от ферромагнитной поверхности.

Для определения и проверки магнитных параметров НУ применяют измерительные приборы с погрешностью измерения не более 5 % [8]. Такими приборами могут быть магнитометры типа МФ-23П, МФ-23ИМ, миллитесламетры, например, МТП (КРМ-Ц-Т), которые измеряют магнитную индукцию B .

Численное значение напряженности H магнитного поля на полюсах НУ и в воздушном зазоре равно:

$$H = \frac{B}{\mu_0},$$

где H — напряженность магнитного поля, А/м; B — индукция магнитного поля, Тл; μ_0 — магнитная постоянная воздуха ($\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м) или

$$H = 0,8B \text{ кА/м}$$

(B — измеренное значение индукции магнитного поля, мТл).

Для измерения усилия отрыва полюсов НУ от ферромагнитной поверхности используют соответствующие динамометры и весы.

Работоспособность НУ оценивают с применением контрольного образца с искусственным дефектом и высококачественного магнитного индикатора. О работоспособности НУ судят по выявляемости искусственного дефекта на контрольном образце. Намагничивание образца осуществляют в соответствии с режимом, который указан в его паспорте, наносят на образец магнитный индикатор и осматривают его индикаторный рисунок. Рисунок на образце должен соответствовать дефектограмме дефекта.

Проверка работоспособности НУ по образцу является качественной оценкой его технического состояния, так как не дает количественных характеристик состояния его магнитной системы и не характеризует чувствительность к дефектам на реальном контролируемом объекте.

В реальных условиях качество МПК, помимо работоспособности системы «НУ—магнитный индикатор» зависит также от многих других факторов, которые должны в определенной степени учитываться при разработке портативных НУ на постоянных магнитах. К таким факторам относятся магнитные характеристики материала контролируемых деталей, узлов и конструкций; форма и размеры деталей в зоне контроля, шероховатость их поверхности; наличие и уровень поверхностного упрочнения, толщина покрытий; местоположение и ориентация дефектов; угол между направлением намагничивания и других факторов.

Анализ режимов намагничивания при МПК. Как известно, МПК изделий проводят в соответствии с технологией или технологической картой. В технологии указывают схему и способ намагничивания объекта контроля, тип магнитного индикатора, способ его нанесения и расположения на объекте, условия и порядок получения информации. Технология МПК характеризуется возможностью обнаружения локального неоднородного магнитного поля рассеяния, которое возникает над дефектом при проведении контроля. В принципе дефекты могут быть выявлены, если при контроле обеспечивается выполнение технологии и выдерживается заданная напряженность магнитного поля. Поэтому для контроля конкретного изделия НУ выбирают таким, чтобы обеспечить схему намагничивания и напряженность магнитного поля, указанные в технологии, т. е. обеспечить режим намагничивания. Выбор режима намагничивания заключается в обеспечении требуемого значения тангенциальной составляющей приложенного магнитного поля. На величину напряженности поля оказывают влияние магнитные свойства материала объекта контроля. В отечественной практике выбор напряженности маг-



нитного поля производят по коэрцитивной силе H_c материала объекта контроля, пользуясь кривыми, приведенными в ГОСТ 21105 [9]. В то же время целесообразно проанализировать подходы к выбору величин тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля, рекомендуемые стандартами международных организаций по стандартизации в области МПК. Широкое распространение метода МПК в мировой практике подтверждается наличием большого количества стандартов Международной организации по стандартизации (ISO), в которой представлено около ста стран. Можно утверждать, что в стандартах ISO обобщен опыт специалистов разных стран, а содержащиеся в них решения удовлетворяют как изготовителей продукции, так и ее потребителей. Кроме того, широко применяются в мире при проведении МПК нормы Американского общества по испытаниям материалов (ASTM), Американского общества инженеров-механиков (ASME), стандарты национальных организаций по стандартизации Германии (DIN) и Великобритании (BSI). Для намагничивания деталей из ферромагнитных материалов в некоторых Европейских и Международных стандартах рекомендуются значения тангенциальной составляющей магнитного поля в пределах от 2 до 6 кА/м [10–13]. В стандартных руководствах по выполнению МПК [14, 15] приводятся рекомендованные значения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в пределах 2,4...4,8 кА/м.

В соответствии с другим стандартным руководством по процедуре МПК напряженность магнитного поля рекомендована в пределах 2,4...4,0 кА/м [16]. В новой редакции ГОСТ 21105 [17], который переиздается в России, предусматривается минимальный диапазон значений тангенциальной составляющей напряженности приложенного магнитного поля от 1,5 до 8,5 кА/м, а максимальный — от 4,5 до 10 кА/м в зависимости от магнитных свойств контролируемого изделия. Такой широкий диапазон значений напряженности магнитного поля позволяет проводить МПК изделий, которые могут значительно отличаться между собой своими магнитными свойствами. Это позволяет также выбирать путем изменения в процессе проведения МПК конструктивных параметров НУ необходимую напряженность магнитного поля в зависимости от формы и размеров контролируемых изделий, вида и толщины покрытий, магнитных свойств материала изделий.

Особенности применения НУ на постоянных магнитах. Следует также провести анализ рекомендаций по применению постоянных магнитов для намагничивания изделий при МПК. Отечественный опыт и разработки НУ на постоянных магнитах ИЭС им. Е. О. Патона, приведенные

на рис. 2–4, показали, что они могут эффективно использоваться при МПК, обеспечивая требуемые значения напряженности магнитного поля для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов. В зарубежных стандартах нет единого подхода и обобщений по использованию постоянных магнитов при МПК. Так, в соответствии с [10, 11] применение постоянных магнитов для намагничивания изделий рекомендуется по договоренности с заказчиком. В работах [13, 14] использование постоянных магнитов рекомендовано с оговоркой в связи с тем, что они с течением времени могут терять намагниченность. Наш опыт показывает, что в течение жизненного цикла намагниченность постоянных магнитов из сплава неодим–железо–бор практически не изменяется, а возможность изменения расстояния между полюсами НУ в процессе проведения МПК не позволяет говорить об этом недостатке постоянных магнитов. В стандартном руководстве [16] по процедуре МПК применение постоянных магнитов не разрешается. Даже в основополагающем международном стандарте [12] среди общих требований к НУ для МПК отсутствуют требования к постоянным магнитам (их свойствам). Следует также отметить, что среди терминов, которые применяются в области МПК [18] и отражают практически все составляющие процесса (физические основы метода, свойства аппаратуры, необходимой для выполнения контроля, индикаторные материалы и особенности технологии) отсутствуют термины, связанные с намагничиванием объектов контроля постоянными магнитами.

Несмотря на это, опыт ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины позволяет утверждать, что НУ на постоянных магнитах имеют свою сферу применения, особенно при локальном МПК деталей и узлов различных технических объектов, включая конструктивно сложные и крупногабаритные, прежде всего в цеховых, стапельных, полевых и других условиях, где отсутствует сеть переменного тока или невозможно применить громоздкие НУ с питанием от электрической сети. При этом необходимо учитывать еще одну особенность выполнения технологии МПК, связанную с обеспечением требуемой чувствительности метода на проверяемых участках изделия для увеличения выявляемости дефекта при полюсном намагничивании. Критерием выявляемости дефектов в контролируемой зоне является отношение $\theta = H_n/H_T$, где H_n и H_T — соответственно значения нормальной и тангенциальной составляющей напряженности поля на поверхности детали в зоне дефекта [19].

На участках проверяемого изделия, где $\theta < 3$, достигается высокая чувствительность МПК. Поэтому при выборе режимов намагничивания способом приложенного поля необходимо определять



как значение тангенциальной составляющей поля в зависимости от магнитных свойств материала проверяемой детали, так и обеспечивать значение $\theta < 3$. Невыполнение этого требования может приводить к необнаружению дефектов [19], однако такое требование в рассмотренных зарубежных стандартах отсутствует. В то же время это требование присутствует в ГОСТ 21105–87 и в новой редакции этого стандарта России [17]. Выполнение этого требования при использовании НУ на постоянных магнитах может обеспечиваться путем изменения расстояния между полюсами.

Выводы

Для контроля разнообразных изделий по форме и размерам, магнитным свойствам материалов объектов контроля магнитные системы переносных НУ в определенной степени должны отличаться универсальностью, которая достигается путем конструирования магнитопроводов в виде нескольких звеньев, связанных между собой шарнирами.

Приведенные конструкции НУ на постоянных магнитах позволяют решать ряд задач магнитной диагностики путем локального намагничивания деталей и узлов различных технических объектов в условиях отсутствия сети переменного тока, во взрыво- и пожароопасных, цеховых, полевых и других условиях.

Выполненный анализ НУ на постоянных магнитах позволяет составить обобщенное представление об их конструктивных и магнитных возможностях, особенностях их применения, что расширяет перспективы создания принципиально новых НУ на постоянных магнитах для магнитной дефектоскопии.

1. Троцкий В. А. Магнитопорошковый контроль сварных соединений и деталей машин. — Киев: Феникс, 2002. — 300 с.
2. Шелихов Г. С. Магнитопорошковая дефектоскопия деталей и узлов. — М.: ГП НТУ «Эксперт», 1995. — 224 с.

3. Аналиди Ю. С., Левый С. В., Магнев А. М. Сравнительный анализ магнитопорошкового и магнитооптического методов визуализации пространственного распределения магнитного поля при исследовании остаточных напряжений // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Приладобудування. — 2006. — № 31. — С. 18–24.
4. Шелихов Г. С. Магнитопорошковая дефектоскопия в рисунках и фотографиях. — М.: ДПТЦ «Дефектоскопия», 2002. — 324 с.
5. *Неразрушающий контроль*. Проспект фирмы «Helling GmbH». — 2004. — 37 с.
6. *Методика проведения контроля сварных соединений магнитоферрозондовым методом*. — Екатеринбург, ООО «Микроакустика», 1996. — 8 с.
7. *Передвижное намагничивающее устройство для магнитопорошкового контроля изделий и сварных соединений*. Рекламное издание. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1990.
8. Шелихов Г. С., Глазков Ю. А. Принципы проверки магнитопорошковых дефектоскопов // Контроль. Диагностика. — 2003. — № 9. — С. 6–8.
9. *ГОСТ 21105–87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод*. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 20 с.
10. *ДСТУ EN 1290–2002. Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Магнітопорошковий контроль зварних з'єднань. Метод*. — Київ: Держспоживстандарт України, 2003. — 12 с.
11. *EN ISO 9934-1. Non-destructive testing. Magnetic particle testing. Part 1: General principles*. Geneva: ISO, 2001. — 14 p.
12. *EN ISO 9934-3. Non-destructive testing. Magnetic particle testing. Part 3: Equipment*. Geneva: ISO, 2002. — 14 p.
13. *ДСТУ EN 10228-1. Неразрушающий контроль кованных изделий из стали. Ч. 1: Контроль магнитным порошком*. — 7 с.
14. *ASTM. Designation E 709-95. Standard Guide for Magnetic Particle Examination*. — 1995. — № 4. — 31 p.
15. *ASTM. E 1444-01. Стандартная методика выполнения магнитопорошкового контроля*, 2001. — 16 с.
16. *EN 602S. Magnetic particle examination. Procedure*. — 23 p.
17. *ГОСТ 21105–2006. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Основные положения*. (Терминология).
18. *ДСТУ EN 1330-7:2006. Неруйнівний контроль. Термінологія. Ч. 7: Терміни, що вживаються в магнітопорошковому контролі*. — Київ: Держспоживстандарт України. — 19 с.
19. Шелихов Г. С. Зависимость выявления дефектов от распределения намагничивающего поля в зоне дефекта // Дефектоскопия. — 2004. — № 6. — С. 52–56.