

# ПОДВИЖНОЕ ЛОКАЛЬНОЕ НАМАГНИЧИВАНИЕ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ПРИ МАГНИТОПОРОШКОВОМ КОНТРОЛЕ

**В. А. ТРОИЦКИЙ**

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены подвижные намагничивающие устройства (НУ) для проведения дефектоскопии различных металлических конструкций. Представлены схемы и принципы работы НУ, уделено внимание их использованию в различных условиях. Отмечены преимущества применения НУ для выявления глубоко расположенных подповерхностных дефектов, рассмотрены технические характеристики и конструкция различных НУ. Использование подвижных намагничивающих устройств открывает новые дефектоскопические возможности для магнитного, в том числе магнитопорошкового контроля, возможность создания особых подвижных поисковых систем. Использование подвижных намагничивающих устройств, перемещаемых по поверхности в разных направлениях, исключает необходимость многократных трудоемких перестановок НУ по поверхности ферромагнитного изделия, уменьшает вероятность появления пропусков и неконтролируемых зон. Появляется возможность обнаружения трещин различной ориентации, динамического, знакопеременного намагничивания за счет разнообразного перемещения подвижных полюсов, что способствует повышению выявления дефектов. Возможность шунтирования основного магнитного потока, введение дополнительных полюсных наконечников различной конфигурации позволяют разрабатывать технологии более надежного магнитопорошкового контроля, включая оценку глубоко залегающих дефектов. Мобильные подвижные намагничивающие устройства с изменяемой величиной основного магнитного потока и отдельных составляющих полей рассеяния должны найти применение не только для магнитопорошкового контроля, но и для других видов магнитных испытаний. Библиогр. 18, табл. 2, рис. 8.

*Ключевые слова: неразрушающий контроль, подвижные намагничивающие устройства, дефектоскопия, шунтирование основного магнитного потока*

Наиболее распространенным методом обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов, зон усталости металлоконструкций [1, 2] является магнитопорошковый контроль (МПК). Объекты МПК – это детали и узлы разнообразных транспортных средств, кранов, станочного оборудования и пр. В МПК используется ряд стандартов [3–6], которые регламентируют поиск дефектов в приложенном или остаточном магнитных полях, создаваемых прилагаемыми намагничивающими устройствами (НУ). В отличие от других методов неразрушающего контроля (НК) при МПК по этим стандартам нет возможности вести непрерывный разнонаправленный поиск дефектов за счет плавного изменения направления магнитного потока, с помощью которого ведется этот поиск.

Этот недостаток можно устранить [2, 7–10], используя подвижные НУ на основе постоянных (неодим, железо, бор) магнитов. С их помощью открылись новые дефектоскопические возможности для магнитного контроля, в том числе МПК, возникли подвижные поисковые системы локального намагничивания. Использование подвижных намагничивающих устройств, перемещаемых в разных направлениях, обеспечивает поиск, сканирование, исключает необходимость многократных трудоемких перестановок прикладываемых НУ к поверхности ферромагнитного изделия, умень-

шает вероятность пропусков дефектов и неконтролируемых зон. Появилась возможность обнаружения трещин различной ориентации, а также знакопеременного намагничивания в зоне индикации за счет возвратно-поступательного перемещения полюсов, что дополнительно способствует повышению выявления дефектов. Разработана и внедрена серия таких подвижных НУ. На рис. 1 показано три простейшие конструктивные схемы исполнения мобильных сканирующих устройств серии ТВА с полюсами в виде дискообразных катков. Они отличаются величиной магнитной проводимости зоны сопряжения их с поверхностью объекта. На рис. 1, а – линия касания круглого полюса и поверхности изделия; 1, б – это пятно, образуемое четырьмя пазами, заполненными ферромагнитными стержнями (роликами); 1, в – расширенная зона контакта за счет полюсного наконечника и нескольких последовательно расположенных контактных роликов в каждом пазу, невилирующих неровности поверхности.

Каждое НУ имеет два полюса и соединительный магнитопровод с источником магнитодвижущей силы (МДС). Магнитные полюса могут двигаться синхронно при использовании жесткого соединительного магнитопровода или раздельно один от другого. При этом соединительный магнитопровод выполняется гибким.

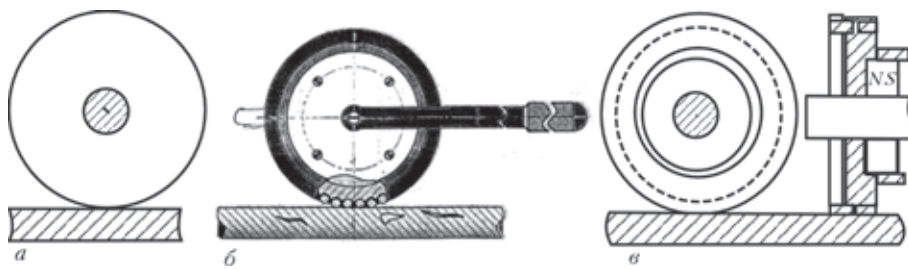


Рис. 1. Варианты конструктивного исполнения устройств серии ТВА: а – с гладкой поверхностью (ТВА-1); б – с пазами и роликами (ТВА-2); в – с полусферическим наконечником и несколькими роликами в каждом пазу (ТВА-3)

На рис. 1 показано по одному полюсу, расстояние между которыми определяется шириной контролируемой зоны. Обычно это 100...150 мм, а диаметры круглых полюсов от 50 до 150 мм. Для эффективного обнаружения дефектов важно в изделии создать достаточную тангенциальную составляющую, которая должна в несколько раз превышать нормальную составляющую магнитного поля. При неизменной величине МДС для увеличения тангенциальной составляющей магнитного поля надо максимально увеличить магнитную проводимость зоны сопряжения полюсов с изделием. Это достигается за счет изготовления по образующей полюса пазов, в которых располагаются ферромагнитные стержни трапецеидального или круглого сечения. На рис. 2 показаны варианты исполнения у ТВА-2, -3 (см. рис. 1) зон сопряжения повышенной магнитной проводимости с заполнением пазов круглыми или трапецеидальными стержнями.

При расчете зон сопряжения повышенной проводимости в устройствах ТВА-2, -3 учитывается диаметр  $D$  полюса, сечение (диаметр  $d$ ) подвижных элементов, расчетная индукция зуба, число элементов (роликов) в пазу и т. п. Так, на рис. 2 оптимальным для систем ТВА-2, -3 с касанием в четырех точках принято  $D = 114$  мм,  $d = 4,3$  мм. Увеличением ширины зоны контакта за счет наконечника (ТВА-3) и диаметра подвижного полюса удастся еще увеличить тангенциальную составляющую поискового магнитного поля, расширить зону контакта, увеличить ее магнитную проводимость. Вариантов конструктивных решений достижения высокой магнитной проводимости может быть много. Так, только увеличением диаметра  $D$  полюса при сохранении ширины зуба и увеличении диаметра  $d$  ферромагнитных стержней (ширины паза) можно контактное пятно довести до 5...6 пазов и т. д.

Интересна особенность динамики поведения контактных стержней в пазах в процессе движения, перемещения зоны локального намагничивания по ферромагнитной поверхности объекта. Ферромагнитные стержни (в каждом пазу один или несколько) любого профиля (круглого или трапецеидального и т.п.) находятся в пазу до тех пор, пока паз не приблизится к ферромагнитной

поверхности объекта, к большой ферромагнитной массе. Поскольку стержни (ролики) в пазу не закреплены, они могут свободно перемещаться. При приближении паза к зоне контакта с изделием, к зоне мощного магнитного потока ферромагнитный стержень (ролик) вытягивается полем из паза и притягивается к изделию. Так обеспечивается высокая магнитная проводимость зоны контакта с изделием. После выхода паза из зоны контакта с изделием каждый стержень (ролик) затягивается обратно в паз полем рассеяния полюса, которое есть вокруг каждого паза.

Таким образом, стержень (ролик) может находиться в двух фазах: транспортной (далеко от изделия) и в контакте с изделием. На рис. 2 показано, как при приближении к поверхности изделия стержень (ролик) выходит из паза. Конструкция полюса с заполненными пазами (табл. 1, 2) увеличивает приложенное магнитное поле внутри изделия. Все устройства ТВА могут изменять направление локального намагничивания до  $180^\circ$ . Максимальное поле рассеяния от дефекта возникает тогда, когда магнитное поле от ТВА направлено перпендикулярно плоскости дефекта. Поэтому очень важно поиск дефектов и намагничивание проводить в разных направлениях, с разной интенсивностью возвратно-поступательных движений, т. е. проводить активный поиск дефектов с низкочастотным воздействием на магнитный порошок. За режимом поиска следует режим оценки обнаружений индикации. При этом должно быть учтено направление

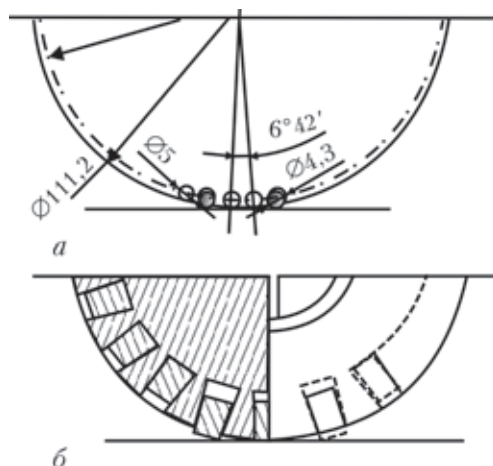


Рис. 2. Конструкции подвижных полюсов с роликами (а) и трапецеидальными стержнями в конструкции типа ТВА-2 (б)

намагничивания и увеличена тангенциальная составляющая магнитного поля, ориентированная перпендикулярно найденной индикации.

В оценочном режиме, в котором устройство ТВА неподвижно, можно увеличить тангенциальную составляющую магнитного поля и за счет съемных дополнительных полюсных элементов. Примеры некоторых из них показаны на рис. 3. С дополнительными полюсными элементами возрастают магнитное поле внутри изделия и усилие притяжения ТВА к объекту. Кроме увеличения тангенциальной составляющей в оценочном режиме желательно принимать меры по уменьшению нормальной составляющей магнитного поля, которое обычно понижает достоверность результатов этого метода НК, экранировать ее.

В поисковом режиме через изделие пропускается только часть магнитного потока, которое создает устройство ТВА, поэтому оно легко передвигается. При этом значительная часть магнитного потока замыкается вне зоны контроля, а магнитная проводимость зоны контакта с изделием относительно низкая. При оценке конкретной индикации, признания ее дефектом (или нет) при

необходимости могут устанавливаться дополнительные элементы магнитных полюсов, которые расширяют зону контакта с изделием (см. рис. 3). Они в определенной мере повторяют локальную конфигурацию поверхности изделия и поверхность круглого полюса. Если индикация (рисунок из магнитного порошка) находится над дефектом, то с увеличением тангенциальной составляющей магнитного поля контуры ее, плотность, рельеф индикаторного рисунка усиливаются. Если неплотности нет, то изменение магнитного потока в изучаемой зоне устраняет или изменяет бесформенный сбор магнитного порошка, индикация рассеивается.

На рис. 3 показаны примеры расположения устройств ТВА со съемными дополнительными элементами на объектах разного профиля. На изделии круглого сечения ТВА может располагаться как вдоль, так и перпендикулярно оси объекта контроля. Во втором случае эти элементы должны иметь расточку по диаметру объекта контроля. Для углового объекта они должны заполнить пространство между изделием и плоскостью подвижного полюса. На рис. 4 показана схема экс-

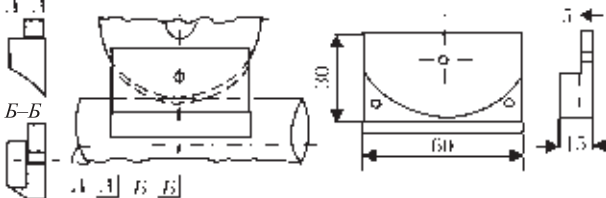
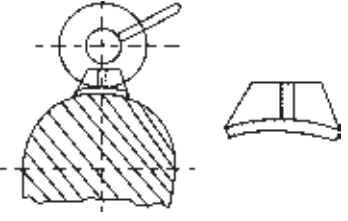
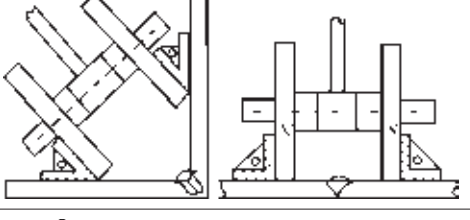
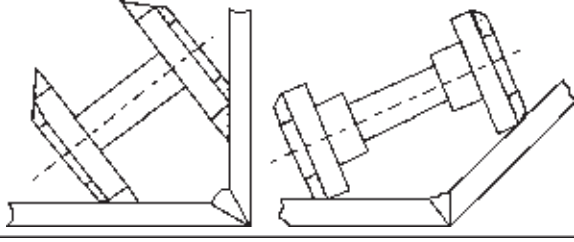
Объект и направление сканирования	Конструкции дополнительных полюсных элементов и их расположение при оценке результатов МПК
Тела вращения малого диаметра, продольное сканирование	
Тела вращения малого диаметра, поперечное сканирование	
Угловые и плоскостные конструкции, продольное сканирование	
Съемные диски для повторения профиля поверхности объекта круглого или плоского сечения	

Рис. 3. Съемные дополнительные полюсные элементы для разных форм, используемые для увеличения тангенциальной составляющей магнитного поля



перимента на объекте в виде пластины из стали размерами 320×165×14 мм, на которой располагали разные ТВА, а измерение магнитного поля проводили тесломером в зазоре  $\delta = 2,0$  мм внутри объекта по центру зазора и по его краям. Места измерений отмечены точками.

При наличии дополнительных полюсных элементов тангенциальная составляющая магнитного поля возрастает в 1,5...2,0 раза. Аналогичные опыты с увеличением расстояния между полюсами в несколько раз за счет удлинения магнитопровода практически не изменили результатов экспериментов. Были испытаны различные типы дополнительных полюсных элементов. Опыты показали, что превносимая дополнительная магнитная проводимость зоны сопряжения зависит только от площади контакта полюса и тела изделия. Это явление происходит до определенного числа съемных полюсных элементов, число которых может при необходимости варьироваться, может быть по одному (рис. 3) или по два (рис. 4) на каждом полюсе. Дальнейшее увеличение площади контакта с изделием существенно не изменяет результаты.

В том случае, если конфигурация поверхности изделия сложная с нерегулярным рельефом, на-

пример, такая, как элементы подвижного железнодорожного состава, то должны использоваться намагничивающие устройства (рис. 5, 6), полюса которых соединены шарнирными или гибкими магнитопроводами, способными обеспечивать синхронное или раздельное (один полюс двигается, а другой стоит) перемещение каждого из полюсов в разных направлениях и разных плоскостях. Наиболее эффективными оказались ТВА-4 с гибкими шарнирными соединительными магнитопроводами. На рис. 6 приведены фотографии локального намагничивания различных частей боковин железнодорожных тележек и колес.

Показаны примеры использования ТВА-4 с шарнирным соединительным магнитопроводом. При необходимости полюса ТВА-4 устанавливаются последовательно (рис. 6, в, г). Подобным локальным регулируемым намагничиванием можно выявить практически все поверхностные и подповерхностные дефекты, в ободах колес, в деталях подвижного состава. На рис. 7 показаны две позиции устройства ТВА-5 с одним подвижным полюсом, выполненным в виде платформы, способной перемещаться на 360° вокруг неподвижного полюса. Контактная сторона подвижной платформы, обращенная к изделию, имеет конструкцию, по-

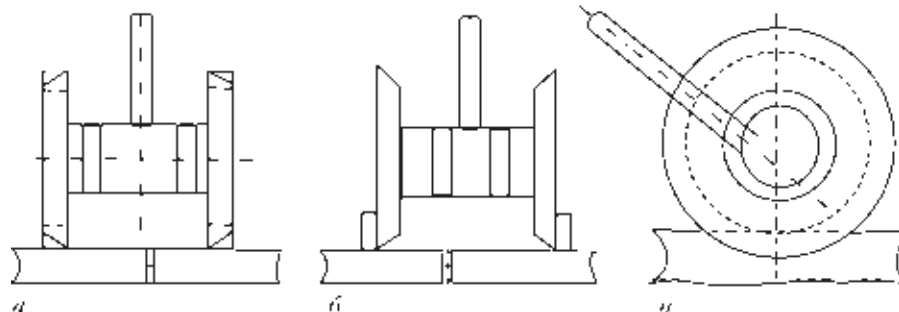


Рис. 4. Схема эксперимента по оценке величины магнитного поля внутри детали, разделенной на две части до (а) и после (б, в) установки дополнительных полюсных элементов для плоских (а) и круглых (б) объектов

Таблица 1. Технические характеристики некоторых намагничивающих устройств ТВА

Тип устройства	Размеры полюсов			Напряженность магнитного поля вне объекта контроля, кА/м		Особенности конструкций ТВА, использованных в эксперименте
	диаметр	ширина	межполюсное расстояние	между полюсами	на наиболее удаленных азимутальных точках	
ТВА-1	114	10	75	25	75/81	Гладкие полюса (рис. 8)
ТВА-2	100	13	98	18	85/92	Полюса с контактными роликами (рис. 1; 2, а)
ТВА-3	110	23	180–110	0,8/11,5	61/64	Многоракурсное ТВА с независимым движением каждого полюса (рис. 6)

Таблица 2. Величина магнитного поля (кА/м) в верхней части воздушного зазора величиной 2 мм, разделяющего пластину 320×165×14 мм на две части (рис. 4)

Тип устройства	Без съемных дополнительных элементов	Со съемными приставными пластинами, имеющими разные размеры, мм		
		6×25×60	12×25×60	6×25×25
ТВА-1	186	250	265	210
ТВА-2	212	270	285	275
ТВА-3	285	302	308	294

Примечание. Измерения проводили тесломером с датчиком Холла

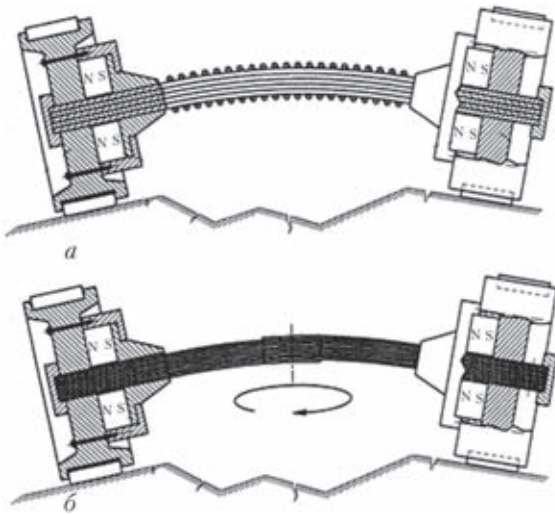


Рис. 5. Схемы ТВА для сложных нерегулярных поверхностей с соединительным магнитопроводом на гибких элементах: тросах (а) и пластинах (б)

добную ТВА-2 (см. рис. 1), т. е. содержит пазы с подвижными роликами. Полюс с подвижной платформой легко перемещается оператором в зоне расположения неподвижного полюса.

Если ТВА предназначено для контроля изделия с определенной конкретной кривизной поверхности, например, для определенного диапазона диаметров валов, труб, то внешняя поверхность полюса изготавливается повторяющей эту кривизну.

На рис. 4 показаны специализированные устройства ТВА-1 с заострением или профилированием внешних плоскостей круглых магнитных полюсов. Это повышает магнитную проводимость в зоне контакта с проверяемым объектом аналогично сочленениям, показанным на рис. 3. Устройства ТВА на рис. 8 показаны в разных ракурсах, с дополнительными полюсными элементами в виде приставных пластин и без них.

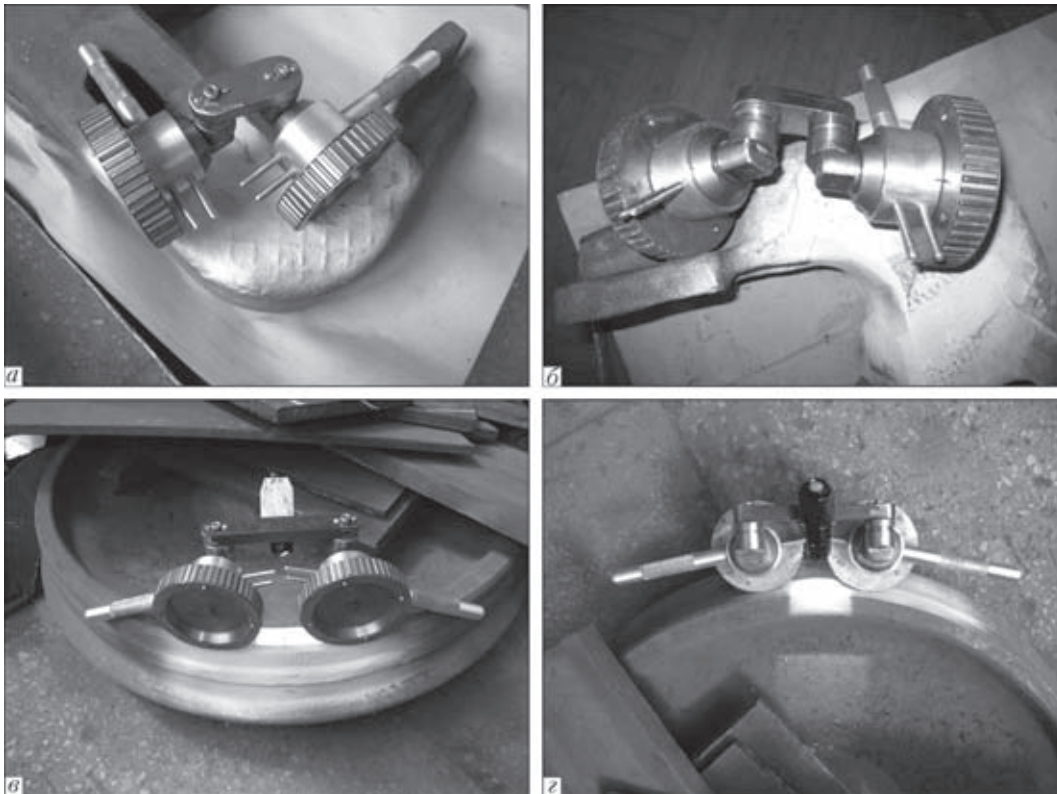


Рис. 6. Использование ТВА-4 для контроля качества боковин тележек (а, б) и элементов железнодорожных колес (в, г)

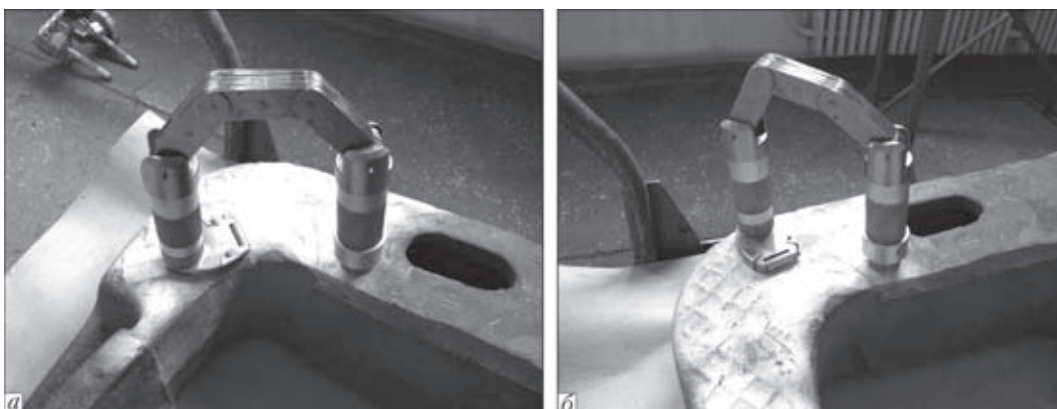


Рис. 7. Устройство ТВА-5 с подвижным полюсом, перемещаемым в зоне расположения неподвижного полюса



В литературе [1, 2, 11–13], посвященной выявляемости дефектов при МПК, показано, что магнитное поле более 100 А/см малоинформативно для обнаружения дефектов шириной 0,005...0,1 мм и глубиной  $h = 1,0...5,0$  мм. Причем величины полей над дефектами глубиной 5 и 1 мм могут отличаться только в 1,5...2,5 раза.

Это свидетельствует о том, что поиск практически всех поверхностных дефектов может проводиться на относительно слабом поле, а распознавание образа индикации на усиленном магнитном поле. Вместе с тем для обнаружения подповерхностных дефектов магнитотвердых металлов требуются магнитные поля больше, чем 100 А/см. Ширина магнитного следа от дефекта на поверхности увеличивается с ростом глубины его залегания, но происходит только до определенной глубины, за пределами которой ширина следа начинает убывать.

В табл. 2 приведены результаты исследований величины магнитных полей внутри щели 2 мм, расположенной между круглыми полюсами трех типов устройства серии ТВА при разных съемных дополнительных полюсных элементах, позволяющих существенно увеличить намагничивающее поле внутри детали. (Испытания выполнены ведущим инженером В. М. Горбиком.)

Из табл. 2 следует, что дополнительные элементы в виде приставных полюсных элементов значительно увеличивают магнитное поле внутри объекта контроля. Это наиболее эффективно проявилось для простейшего ТВА-1 с гладкими полюсами. Здесь магнитное поле выросло в 1,43 раза и наименее эффективно в случае ТВА-3 с пазами, где поле усилилось только в 1,08 раза, что и следовало ожидать. Таким образом, все модели ТВА обеспечивают глубокое регулируемое локальное

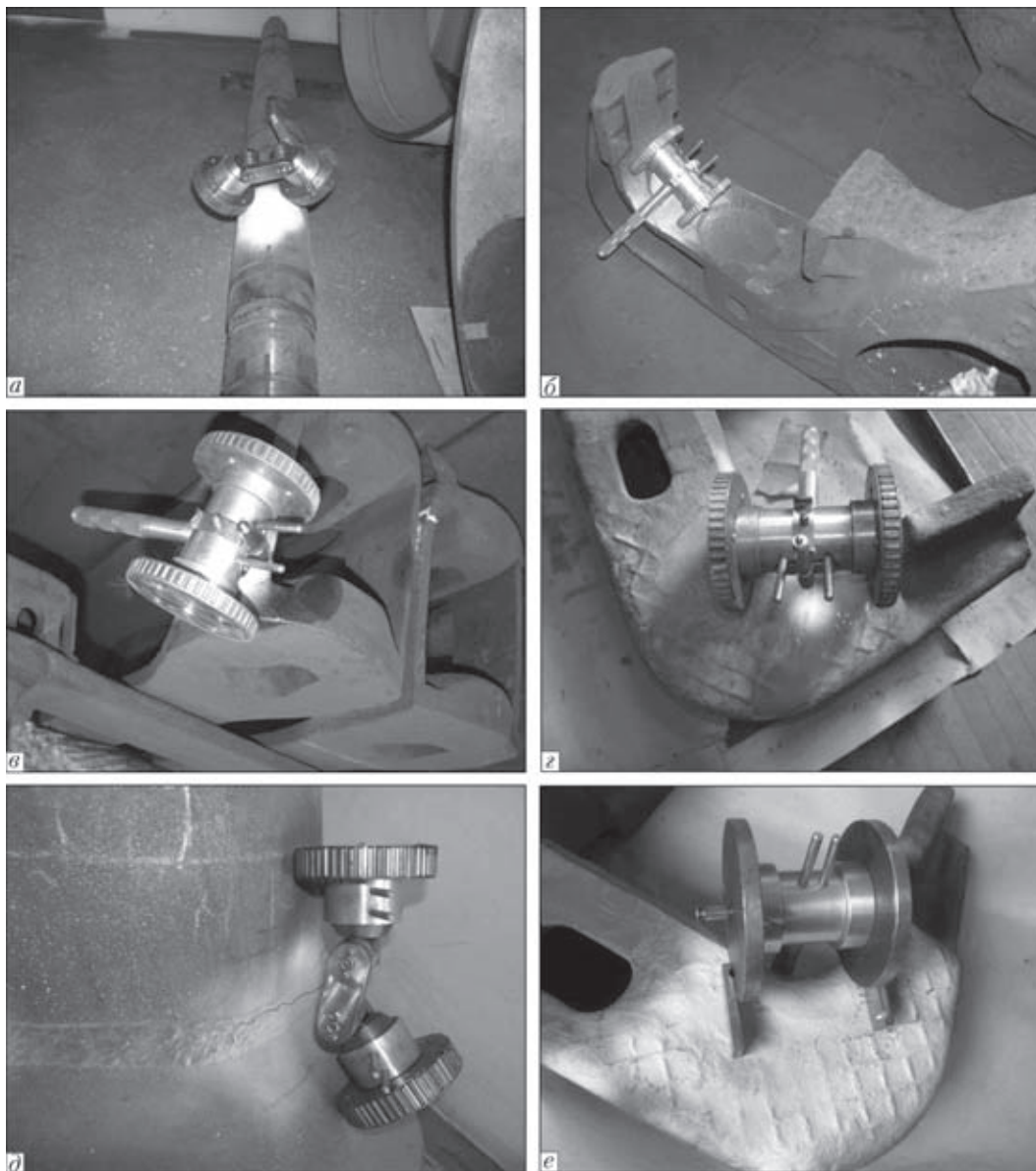


Рис. 8. Использование ТВА-4 на валу мощного компрессора (а); ТВА-2 на элементах железнодорожных конструкций (б–с); ТВА-4 на гйбе трубопровода диаметром 1020 мм (д); ТВА-1 с дополнительными полюсными элементами в режиме оценки индикации (е)



промагничивание излучаемых ферромагнитных объектов. Уменьшение намагничивающих полей, например, для магнитомягких сталей, легко получить уменьшением числа источников МДС, расположенных внутри соединительного магнитопровода ТВА, которые рассчитаны преимущественно для исследования магнитотвердых сталей больших толщин, имеют мощные многоэлементные источники МДС.

### Выводы

Подвижное локальное намагничивание приложенным магнитным полем открывает новые возможности для магнитных методов, расширяет возможности МПК, увеличивает в несколько раз его производительность, обеспечивает режимы поиска и оценки индикаций за счет величины и направления тангенциальной составляющей магнитного поля.

Мобильные намагничивающие устройства серии ТВА обеспечивают разнонаправленное пропускание через металлоконструкцию магнитного потока, поиск направления, дающего наиболее рельефную форму индикации, уменьшает количество ложных индикаций.

Возможность возвратно-поступательных перемещений устройств ТВА способствует лучшему распределению магнитного порошка, его концентрации над поверхностными полями, которые могут быть как над дефектом, так и над зонами внутренних напряжений, например, из-за усталости металла и других причин.

Поиск индикаций рекомендуется вначале вести при относительно небольшом магнитном поле, определяемом свойствами стали, типом ожидаемых дефектов и других обстоятельств, предусмотренных технологией контроля, а оценку индикаций проводить при усилении тангенциальной составляющей магнитного поля, используя, на-

пример, дополнительные полюсные элементы и экранирование нормальной составляющей поля в зоне индикации.

1. *Не разрушающий контроль качества сварных конструкций* / В. А. Троицкий, В. П. Радько, В. Г. Демидко, В. Т. Бобров. – Киев: Техника, 1986. – 159 с.
2. *Троицкий В. А.* Магнитопорошковый контроль сварных соединений и деталей машин. – Киев: Феникс, 2002. – 300 с.
3. *ISO 9934-1.* Non-destructive testing. Magnetic particle testing. Pt 1: General principles. – Geneva: ISO, 2001. – 14 p.
4. *ISO 9934-1.* Non-destructive testing. Magnetic particle testing. Pt 2: Detection media. Geneva: ISO, 2002. – 21 p.
5. *ISO 9934-1.* Non-destructive testing. Magnetic particle testing. Pt 3: Equipment. Geneva: ISO, 2002. 14 p.
6. *ГОСТ Р ИСО 9934-1–2011.* Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Ч. 1. Основные требования. – М., 2011.
7. *Пат. 51871* Україна. Рухомий намагнічуючий пристрій для магнітної дефектоскопії / В. О. Трійський, О. Г. Бондаренко, В. М. Горбик. – Дійсний з 10.08.2010.
8. *Пат. 77027* Україна. Рухомий намагнічуючий пристрій для магнітної дефектоскопії / В. О. Трійський, О. Г. Бондаренко, В. В. Самойлович. – Дійсний з 25.01.2013.
9. *Пат. 81659* Україна. Рухомий намагнічуючий пристрій / В. О. Трійський. – Дійсний з 10.07.13.
10. *Пат. 82447* Україна. Рухомий намагнічуючий пристрій для дефектоскопії протяжних конструкцій / В. О. Трійський. – Дійсний з 12.08.13.
11. *Шелихов Г. С.* Магнитопорошковая дефектоскопия / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Изд. Дом «Спектр», 2010. – 336 с.
12. *Пашагин А. П., Бенклевская Н. П.* Выявляемость поверхностных дефектов малого раскрытия при магнитной дефектоскопии // Дефектоскопия. – 2013. – № 1. – С. 66–70.
13. *Коваленко А.* Анализ факторов, влияющих на достоверность контроля трубопроводов магнитными дефектоскопиями // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 8. – С. 30–36.
14. *Шелихов Г. С., Глазков Ю. А.* Особенности ГОСТ Р ИСО 9934-1 по магнитопорошковому контролю деталей // Там же. – 2013. – № 4. – С. 9–15.
15. *Патон Б. Е., Троицкий В. А.* Деятельность ИЭС им. Е. О. Патона в области неразрушающего контроля // Территория NDT. – 2013. – № 3.
16. *Пат. 82208* Україна. Намагнічуючий пристрій / В. О. Трійський, Г. Г. Луценко. – Дійсний з 25.07.2013.
17. *Пат. 82209* Україна. Намагнічуючий пристрій / В. О. Трійський, Г. Г. Луценко. – Дійсний з 25.07.2013.
18. *Пат. 62064* Україна. Спосіб виготовлення контрольних вірців для дефектоскопії / В. О. Трійський, О. Г. Бондаренко. – Дійсний з 10.08.2011.

The paper considers mobile magnetizers (MM) for performance of flaw detection of different metal structures. Schemes and principles of MM operation are shown and attention is given to their application under different conditions. The advantages of MM application for detection of deep-lying subsurface defects are noted and performance specification and structure of different MM are considered. Application of mobile magnetizers reveals the new flaw detection capabilities for magnetic as well as magnetic particle testing and possibility of development of special mobile detection systems. Using of mobile magnetizers, moving in different directions on the surface, eliminates the necessity of multiple laborious rearrangements of MM on the surface of ferromagnetic product, reduces the probability of missing and appearance of uncontrolled zones. There is a possibility of detection of cracks of different orientation, dynamic and alternated magnetization due to different movement of mobile poles that promotes increase of defect identification. Possibility of shunting of a main magnetic field and introduction of the additional pole pieces of different configuration allow developing the technologies of more reliable magnetic control, including evaluation of deep-lying defects. Mobile magnetizers with variable value of main magnetic field and separate constituents of leakage fields should find application in magnetic control as well as in other types of magnetic tests. References 18, Tables 2, Figures 8.

*Keywords:* non-destructive testing, mobile magnetizers, flaw detection, shunting of main magnetic field.

Поступила в редакцию  
13.01.2014