

В. И. ШАРАНДО, канд. техн. наук

А. П. ГУСЕВ, д-р техн. наук

И. Е. ЗАГОРСКИЙ,

А. А. ПОЛОНЕВИЧ

Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Исследовано влияние степени пластической деформации образцов из сталей Ст.20 и 13Х, 12Х18Н10Т, пермаллоя 79НМ и электролитического никеля на интенсивность магнитного потока, формируемого при их контакте с магнитодинамическим толщиномером МТЦ-3-2, и на величину оставленной этим толщиномером остаточной намагниченности, измеряемой прибором ИОН-4. Показано, что контроль структуры данных материалов возможен с использованием указанных средств неразрушающего контроля.

Ключевые слова: магнитодинамический контроль, ферромагнитные материалы, структурное состояние, пластическая деформация.

Введение. В Институте прикладной физики НАН Беларуси разработан магнитодинамический метод контроля, основанный на регистрации изменения магнитного потока в индукционной катушке, охватывающей сопряженный со стержневым магнитом стальной наконечник, который приводится в соприкосновение с контролируемым изделием и удаляется с фиксацией возникшего в катушке электрического импульса. Снимаемый с катушки сигнал зависит от количества ферромагнитного материала в информативной зоне и может характеризовать геометрические параметры изделия или слоёв на его поверхности [1]. С использованием данного метода разработаны и нашли широкое применение в промышленности магнитные толщиномеры типа МТЦ [2] для контроля немагнитных и слабомагнитных покрытий на ферромагнетиках, а также никелевых покрытий на немагнитных основаниях. Такой же принцип измерений осуществлён в измерителях остаточных магнитных полей типа ИОН [2], в которых используется устанавливаемая на намагниченное изделие индукционная катушка без магнита и при её подъеме регистрируется возникающий импульсный электрический сигнал. В работах [3, 4] показано, что магнитодинамический метод контроля обладает чувствительностью к вызванным технологическими факторами либо пластической деформацией структурным напряжениям в материалах ферромагнитных слоёв и покрытий при их толщинометрии. Одновременное применение указанных приборов позволяет корректировать результаты измерений и уменьшать погрешности контроля.

В настоящей работе показана возможность магнитодинамического контроля структурного состояния ряда достаточно массивных ферромагнитных

материалов на основе железа и никеля после их пластического деформирования. Контроль осуществляется по двум параметрам: интенсивности магнитного потока при контакте намагничивающей системы с поверхностью изделия и напряжённости поля остаточной намагниченности.

Использованная аппаратура и образцы. В магнитодинамических исследованиях использован толщиномер МТЦ-3-2 [2], преобразователь которого содержит магнит из $NdFeB$ с энергией 45 мДж, диаметр магнита и стального наконечника со сферическим окончанием составляет 5 мм. С помощью измерителя остаточной намагниченности ИОН-4 [2] определялся поток остаточной индукции от локального магнитного пятна, созданного в образце преобразователем толщиномера МТЦ-3-2. Для попадания центров преобразователей обоих приборов в одну точку они устанавливались в единый цилиндрический кондуктор. Измерения сигналов осуществлялись в безразмерных единицах – условных величинах.

Исследования выполнены на образцах различающихся по содержанию углерода сталей Ст.20 и 13Х в исходно нормализованном состоянии, нержавеющей стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки, отожжённого пермаллоя 79НМ, а также отожжённого электролитического никеля высокой чистоты Н-1у производства комбината «Североникель». Пластинки указанных материалов толщинами от 0,1 до 1 мм прокатывались при комнатной температуре и затем складывались в стопки с разной степенью деформации площадью 4 см² и высотой порядка 4 мм, гарантировавшими отсутствие влияния на результат измерений краевого эффекта и толщины образца.

Результаты исследований. На рис. 1 представлены зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 и ИОН-4 от степени деформации образцов из стали Ст.20.

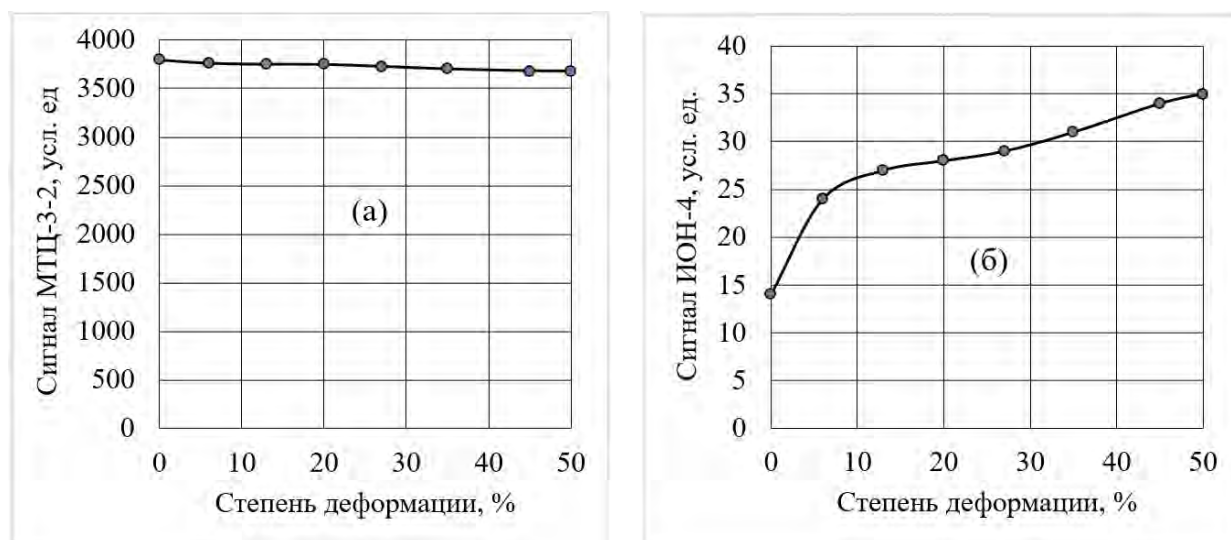


Рис. 1. Зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 (а) и ИОН-4 (б) от степени деформации образцов из стали Ст.20

Из рис. 1(а) следует, что с возрастанием степени деформации происходит слабое уменьшение сигналов толщиномера МТЦ-3-2, что связано с ростом искажений кристаллической решётки рассматриваемой стали и некоторым

уменьшением в намагничивающе-измерительной системе магнитного потока. Рис. 1(б) показывает возрастание остаточной намагниченности с ростом степени деформации, что также отражает увеличение несовершенств решётки и уменьшение подвижности доменной структуры.

На рис. 2 представлены зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 и ИОН-4 от степени деформации образцов из стали 13Х.

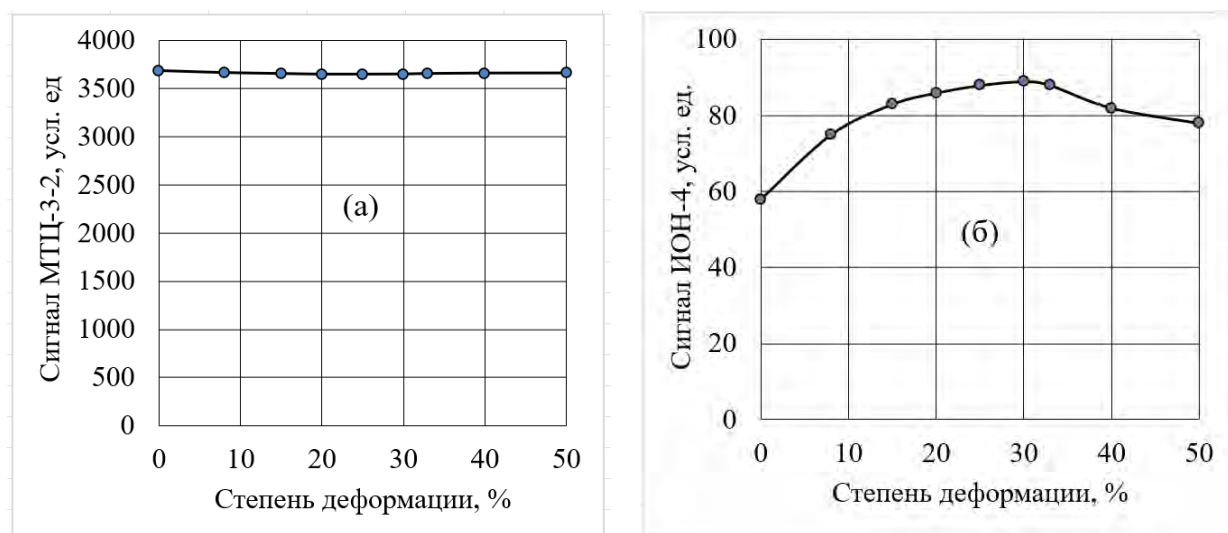


Рис. 2. Зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 (а) и ИОН-4 (б) от степени деформации образцов из стали 13Х

Зависимости аналогичны показанным на рис. 1, но изменения сигналов толщиномера МТЦ-3-2 с ростом деформации оказываются меньшими в связи с более высоким содержанием в стали углерода и, соответственно, присутствием в её структуре уже в исходном состоянии более выраженных структурных искажений. По этой же причине сигналы приборов ИОН-4 для исходной и деформированной стали 13Х оказываются значительно выше, чем для стали Ст.20.

В практическом плане применения прибора МТЦ-3-2 для толщинометрии покрытий на этих или аналогичных им углеродистых конструкционных сталях из близости по величинам сигналов кривых на рис. 1(а) и рис. 2(а) следует, что контроль может вестись с использованием единой для всех их градуировки. При переходе к другой марке стали или наличии в материале основания структурных напряжений обеспечение высокой точности измерений достигается произведением начальной настройки нуля на поверхности изделия с отсутствующим покрытием.

Характер кривых рис. 1(б) и рис. 2(б) показывает возможность их использования для определения материала, на который нанесено покрытие. При исследованиях, не связанных с толщинометрией, одновременное использование обеих методик магнитодинамического контроля позволяет получать расширенную информацию об изучаемых материалах.

На рис. 3 представлены зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 и ИОН-4 от степени деформации образцов из стали 12Х18Н10Т.

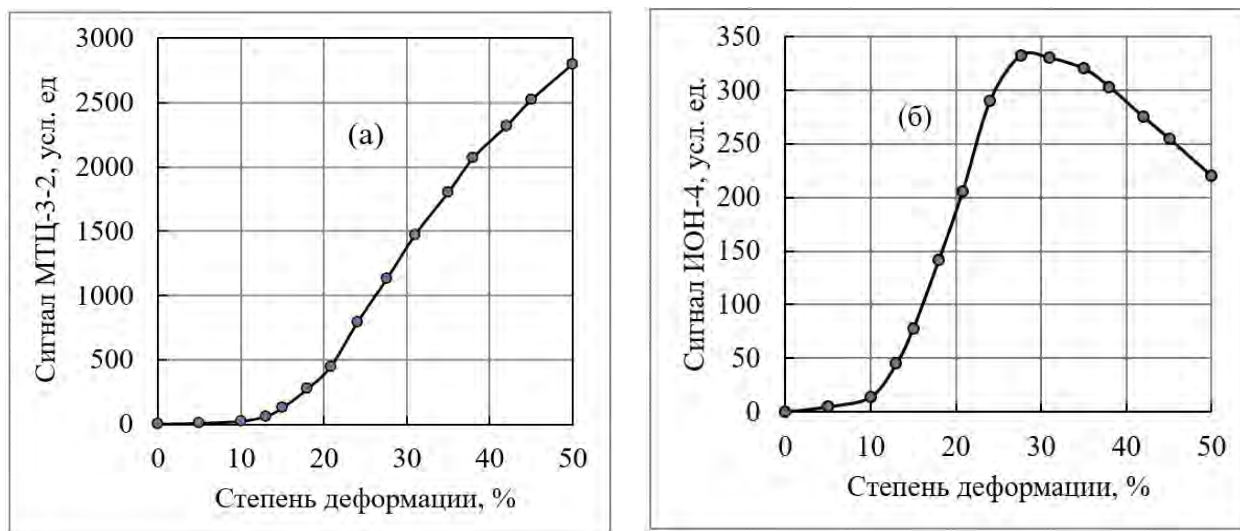


Рис. 3. Зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 (а) и ИОН-4 (б) от степени деформации образцов из стали 12Х18Н10Т

Высоколегированная нержавеющая аустенитная сталь 12Х18Н10Т поставляется потребителям в состоянии после закалки от температур $1000 \div 1050^\circ\text{C}$ и имеет преобладающую парамагнитную γ -структуру. Механическое воздействие на эту сталь приводит к формированию в структуре новой ферромагнитной α -фазы – мартенсита. Согласно рис. 3(а), сигналы прибора МТЦ-3-2, при практически нулевом их значении на исходном материале, возрастают с увеличением степени деформации образцов, что связано с увеличением участвующего в создании магнитного потока количества ферромагнитной фазы. Из рис. 3(б) следует, что величины сигналов прибора ИОН-4 образуют максимум в области деформаций 30%. Наличие перегиба на кривой остаточной намагниченности отражает характер выполнения измерений при магнитодинамическом контроле: намагничивание внешним источником поля локальной зоны на поверхности изделия и съём с неё информации с помощью внешнего датчика. Появление максимума может быть связано с двумя разнонаправленными процессами: при начальных деформациях преобладает эффект увеличения, в том числе в информационном слое у поверхности, количества ферромагнитной фазы, а далее всё большую роль играет внутреннее замыкание локально намагниченной зоны на глубинные слои образца.

Из анализа кривых на рис. 3 следует, что для толщинометрии покрытий на рассмотренных материалах необходимо создавать ряд градуировок для прибора МТЦ-3-2, практический выбор которых применительно к конкретному структурному состоянию материала основания можно осуществлять по показаниям прибора ИОН-4.

Широкий диапазон изменения как интенсивности магнитного потока, так и напряжённости поля остаточной намагниченности при деформации данной стали указывает на хорошие перспективы применения магнитодинамического метода в её исследованиях.

На рис. 4 представлены зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 и ИОН-4 от степени деформации образцов из пермаллоя 79НМ.

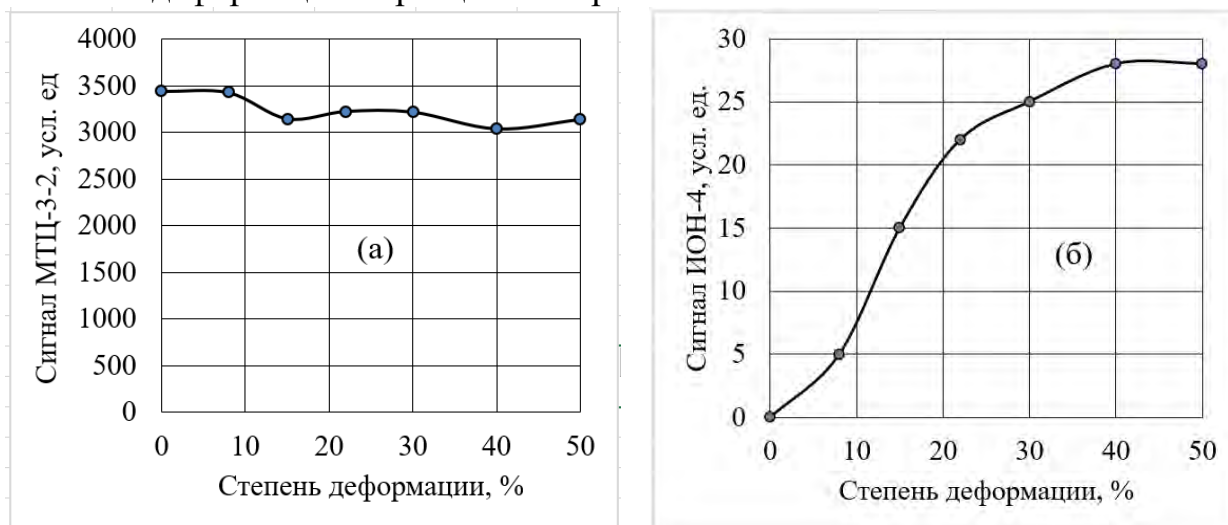


Рис. 4. Зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 (а) и ИОН-4 (б) от степени деформации образцов из пермаллоя 79НМ

Из рис. 4 видно, что магнитодинамический метод может быть использован для исследования пермалловых сплавов. Сигналы обоих приборов по порядку величин близки представленным на рис. 1 и рис. 2. Требуемый по многим производственным технологиям контроль степени структурных напряжений в данном материале наиболее эффективно можно вести по величине остаточной намагниченности. Зависимость этой характеристики на рис. 4(б) плавно нарастает от нулевого показания в отожжённом состоянии до определённых, близких к насыщению значений при степени деформации 50%.

Толщинометрия покрытий с применением прибора МТЦ-3-2 на данном материале может давать приблизительные результаты, корректировка которых с помощью прибора ИОН-4 требует дополнительных исследований.

На рис. 5 представлены зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 и ИОН-4 от степени деформации образцов из электролитического никеля.

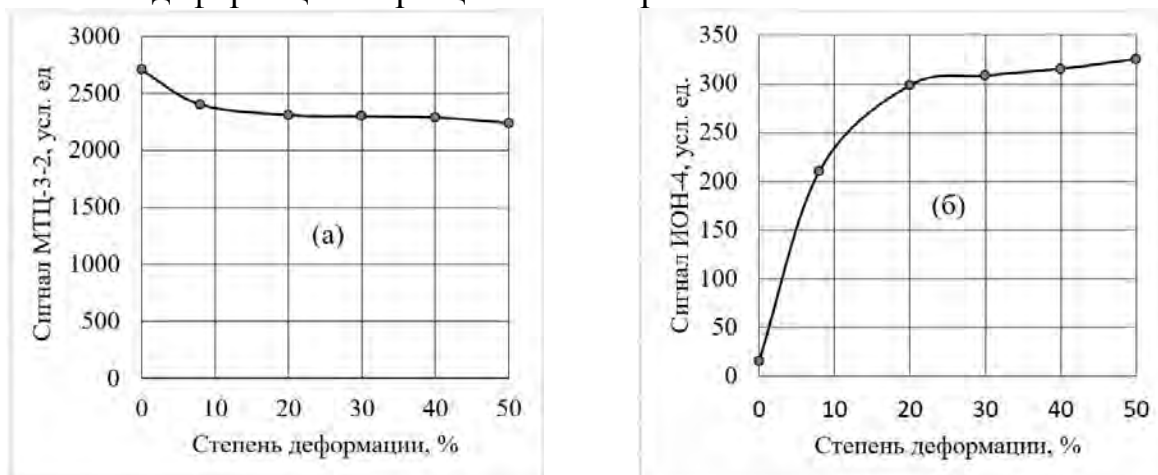


Рис. 5. Зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 (а) и ИОН-4 (б) от степени деформации образцов из электролитического никеля

Из рис. 5(а) следует, что с увеличением степени деформации никелевых образцов происходит уменьшение величин сигналов прибора МТЦ-3-2. При деформациях 20÷50% их изменение практически прекращается. Приведённые на рис. 5(б) показания прибора ИОН-4 на начальных этапах деформирования резко возрастают и также практически стабилизируются при прокатке образцов до 50%. Данные эффекты отражают процесс насыщения никеля дефектами решётки и создания в нём структурных напряжений.

Толщинометрия покрытий на никелевых основаниях при высоких требованиях к погрешностям может вызвать необходимость создания ряда градуировок, выбор которых возможен по измерениям остаточной намагниченности.

Выводы. Полученные результаты показывают, что магнитодинамический метод неразрушающего контроля и разработанные на его основе толщиномер покрытий МТЦ-3-2 и измеритель напряжённости остаточных магнитных полей ИОН-4 обладают высокой чувствительностью к содержанию ферромагнитной фазы в различных металлических материалах и могут применяться для определения состояния структур, образующихся в процессах их пластического деформирования. Совместное применение этих двух методик магнитодинамических измерений позволяет с повышенной достоверностью вести контроль состояния ферромагнитных изделий после их термомеханической обработки, а также уменьшать погрешности при проведении толщинометрии покрытий на данных и схожих с ними материалах. При контроле толщин покрытий на одних основаниях можно осуществлять только подстройку нуля регистрирующего прибора, на других – создавать несколько градуировок и использовать их исходя из результатов измерения остаточной намагниченности.

Список литературы

1. Лухвич, А.А. Магнитные толщиномеры нового поколения / А.А. Лухвич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – №4. – С. 3-15.
2. Разработки лаборатории металлофизики ИПФ НАН Беларуси в области неразрушающего контроля [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://iaph.bas-net.by/lab1/products/> – Дата доступа: 10.07.2026.
3. Шарандо, В.И. Применение магнитодинамического метода контроля при изучении процессов деформации разнотолщинных листов стали 12Х18Н10Т / В.И. Шарандо, А.В. Чернышев, Н.В. Кременькова, В.Д. Пиунов, А.А. Полоневич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2023. - № 3. – С. 19–25.
4. Шарандо, В.И. Магнитодинамическая толщинометрия деформированных и отождённых никелевых слоёв и покрытий / В.И. Шарандо, И.Е. Загорский, А.А. Полоневич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2025. - № 1. – С. 19-25.

Контакты:

sharando@iaph.bas-net.by (Шарандо Владимир Иванович);
lab1@iaph.bas-net.by (Гусев Александр Петрович);
lab1@iaph.bas-net.by (Загорский Иван Евгеньевич);
lab1@iaph.bas-net.by (Полоневич Александр Антонович).