

В. И. ШАРАНДО, канд. техн. наук
А. В. ЧЕРНЫШЕВ, канд. техн. наук
И. Е. ЗАГОРСКИЙ
А. А. ПОЛОНЕВИЧ

Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ РАЗНОТОЛЩИННОЙ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т

Аннотация

Исследовано влияние степени пластической деформации и толщины образцов из промышленно изготовленного листа стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм, наружных и внутренних слоёв листа этой же стали толщиной 10 мм на интенсивность магнитного потока, формируемого при их контакте с магнитным толщиномером, и величину оставляемой этим толщиномером остаточной намагниченности, а также на амплитуды вносимой ЭДС накладного вихретокового преобразователя и ее третьей гармонической составляющей. Установлены максимальные толщины образцов, с достижением которых прекращается изменение сигналов приборов, измеряющих эти характеристики. Показано, что процесс деформационного образования ферромагнитной фазы протекает наиболее интенсивно во внутренних слоях толстого листа и наименее активно в тонком листе. Контроль структуры аустенитных сталей возможен с использованием магнитодинамических и электромагнитных приборов.

Ключевые слова: аустенитная сталь, магнитодинамический контроль, электромагнитный контроль, пластическая деформация, внутренние и наружные слои изделия.

Введение. Выпускаемые промышленностью нержавеющей аустенитные стали непосредственно после изготовления имеют преимущественно парамагнитную γ -структуру. Их механическая обработка может приводить к возникновению ферромагнитной α -фазы – мартенсита деформации. В работах [1,2] исследовано влияние степени пластической деформации и толщины образцов из разнотолщинных листов стали 12Х18Н10Т, наружных и внутренних слоев листа этой стали на интенсивность магнитного потока, формируемого при их контакте с магнитным толщиномером, и величину оставляемой этим толщиномером остаточной намагниченности. В работах [3,4] исследовано влияние этих физических и геометрических характеристик указанных образцов на амплитуды вносимой ЭДС накладного вихретокового преобразователя и ее третьей гармонической составляющей.

В настоящей работе приводятся обобщённые результирующие данные по выполненным исследованиям, показывающие возможность применения

магнитодинамического и электромагнитного методов для контроля аустенитных сталей; рассматривается отражение измеряемыми с помощью соответствующих приборов сигналами физических процессов, протекающих в структуре этих сталей при пластическом деформировании.

Использованная аппаратура и образцы. В магнитодинамических исследованиях использован толщиномер МТЦ-3-2 [5], регистрирующий изменения магнитного потока в индукционной катушке, охватывающей сопряженный со стержневым магнитом стальной наконечник с торцевым сферическим завершением. При измерениях наконечник приводится в соприкосновение с контролируемым образцом, после чего удаляется с фиксацией возникшего в катушке электрического импульса. Снимаемый с катушки и измеряемый в безразмерных единицах сигнал характеризует количество ферромагнитного материала в информативной зоне, т. е. зависит от концентрации и распределения в ней α -фазы, толщины образца. Преобразователь прибора МТЦ-3-2 содержит магнит из NdFeB с энергией 45 мДж, диаметр магнита и наконечника составляет 5 мм. Измеритель остаточной намагниченности ИОН-4 [5] использует устанавливаемую на намагниченный образец индукционную катушку без магнита. При подъеме катушки регистрируется возникающий в ней импульсный электрический сигнал. В нашем случае определялся поток остаточной индукции от локального магнитного пятна, предварительно созданного в образце преобразователем толщиномера МТЦ-3-2.

При электромагнитных исследованиях измерялись амплитуды вносимой ЭДС и третьей гармонической составляющей в выходном сигнале накладного вихретокового преобразователя, состоящего из трех расположенных соосно катушек – поля возбуждения, измерительной и компенсационной. Две последние катушки, включенные дифференциально между собой, располагались у торцов катушки поля возбуждения. Наружные диаметры катушек равнялись 10 мм. По катушке поля возбуждения пропускался ток синусоидальной формы частотой 2,5 кГц. Амплитуда напряженности поля возбуждения преобразователя у его поверхности в центре составляла 2400 А/м. Для измерения третьей гармонической составляющей преобразователь подключался к прибору ПКТ-2 [6].

Для получения образцов из наружного и срединного слоёв листовой стали 12Х18Н10Т толщиной 10 мм в состоянии поставки были вырезаны пластинки размером 20×20 мм², толщиной около 2 мм и прошлифованы, избегая наклепа, до толщин $1,4 \div 1,5$ мм. Из этого же стального листа была вырезана также цельная плитка размером $20 \times 20 \times 10$ мм³. Пластинки таких же параметров площади были изготовлены из листа стали в состоянии поставки толщиной 1 мм. Затем плитка и все пластинки прокатывались при комнатной температуре в двух взаимно перпендикулярных направлениях с обеспечением последовательного ряда степеней пластической деформации. Измерения сигналов магнитодинамических и электромагнитных приборов проводились

после каждого цикла прокатки на плитке и образцах из пластинок с одинаковой степенью деформации, сложенных в отдельные для каждого из материалов стопки переменной суммарной толщины.

Результаты исследований. На рис. 1 представлены зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 и ИОН-4 от толщины образцов, полученных из листа толщиной 1 мм, при разных степенях их пластической деформации.

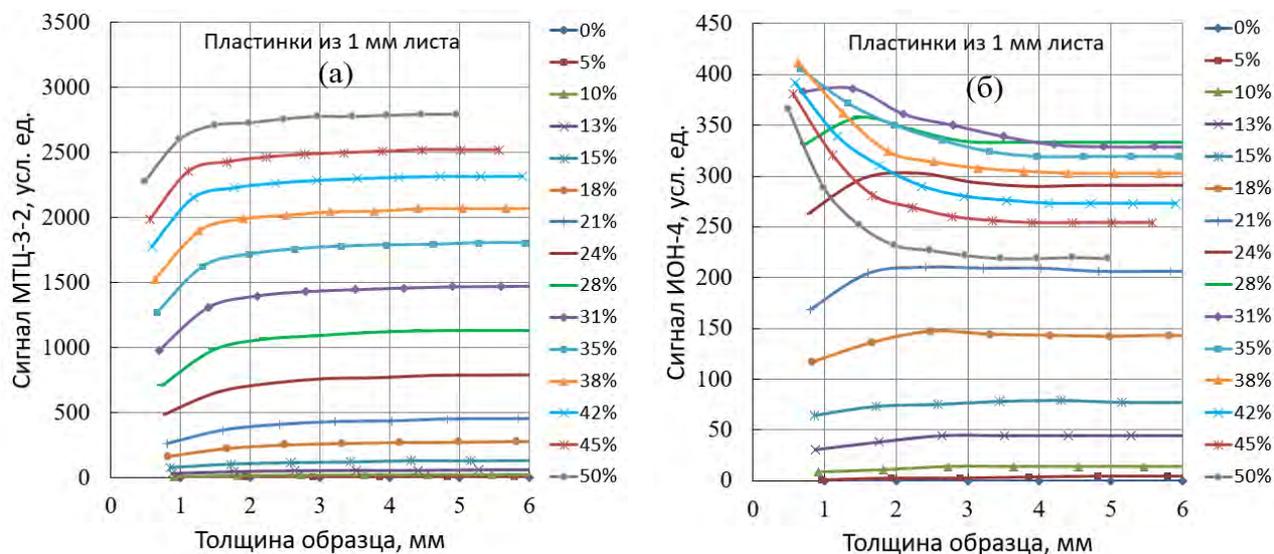


Рис. 1. Зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 (а) и ИОН-4 (б) от толщины образцов, полученных из листа толщиной 1 мм, при степенях деформации $\varepsilon = 0 \div 5 \%$

Из рис. 1а следует, что во всем диапазоне деформаций происходит рост измеренных сигналов с возрастанием толщины образцов, связанный с попаданием в информативную зону преобразователя прибора большего количества ферромагнитного материала и увеличением в измерительной системе магнитного потока. Сигналы перестают изменяться при достижении толщин 3÷4 мм. Не показанные в данной работе зависимости для образцов, изготовленных из внешних и внутренних слоев листа толщиной 10 мм, имеют схожий с рис. 1а вид, но характеризуются сдвигом вверх величин сигналов. Это объясняется тем, что в них процессы закалки при производстве проходили менее интенсивно, в результате чего возникло большее количество начальной ферромагнитной фазы и больше зародышевых центров для образования ферромагнитной фазы при последующем деформировании. Наибольший сдвиг соответствует подвергнутым наименее интенсивной закалке внутренним слоям листа.

Рис. 1б показывает, что все зависимости, имея нулевые значения при нулевой толщине, проходят через характерный для каждой из них свой максимум. Высота его возрастает с ростом степени деформации, а пик не всегда наблюдаем из-за отсутствующих в экспериментах толщин образцов порядка долей миллиметра. Само наличие максимумов на кривых остаточной

намагниченности отражает характер измерений при магнитодинамическом контроле: намагничивание внешним источником поля локальной зоны, распространяющейся на ограниченную глубину под поверхностью образца, и съём с неё информации с помощью внешнего датчика. Увеличение толщины образца приводит к росту количества остаточного намагниченного ферромагнитного материала в информативной зоне преобразователя и соответствующему росту измеренного сигнала. Одновременно растёт магнитный поток, обусловленный окружающими намагниченную зону боковыми и глубинными ферромагнитными объемами, вследствие увеличения площади сечения замыкающего эту зону внутреннего магнитопровода, что снижает величину снимаемого внешним датчиком сигнала. Эти два разнонаправленных процесса приводят к появлению максимумов на кривых. При толщинах образцов свыше 3÷4 мм величины сигналов стабилизируются. Зависимости для образцов, изготовленных из внешних и внутренних слоев листа толщиной 10 мм, имеют отличные от рис. 1 положения максимумов, но также стабилизируются при толщинах свыше 3÷4 мм.

На рис. 2 представлены зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 и ИОН-4 от степени деформации образцов из листа стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм, материалов наружных и внутренних слоев листа толщиной 10 мм. Рассматриваются кривые, приведенные к единой толщине образцов 4 мм, производится их сравнение с зависимостями, полученными на подвергнутой последовательному деформированию цельной плитке из этого же 10-мм листа.

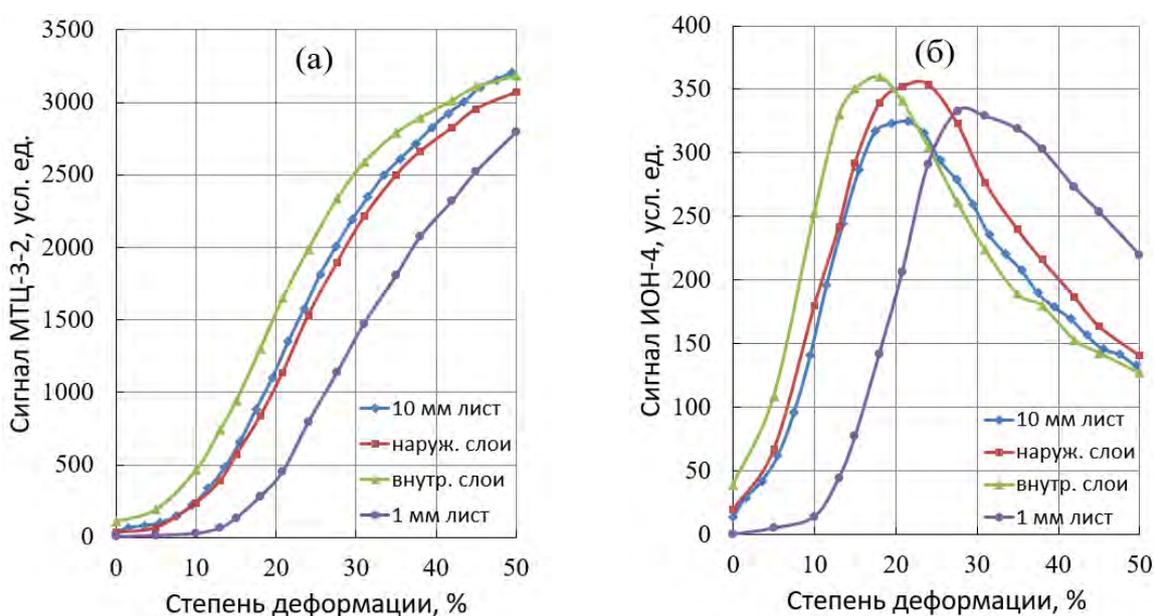


Рис. 2. Зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 (а) и ИОН-4 (б) от степени деформации образцов из стальных листов толщиной 1 и 10 мм, наружных и внутренних слоев листа толщиной 10 мм

Из рис. 2 видно, что кривые величин сигналов обоих приборов, полученные на образцах из внутренних слоев 10-мм листа, смещены в область более малых деформаций относительно кривых для образцов из наружных слоев. Это говорит о существовании в них большего количества предрасполагающих факторов для создания ферромагнитной фазы при последующем деформировании. Наиболее медленно образование новых структур происходит в исходном 1-мм листе. Соответственно, измеряемый прибором МТЦ-3-2 магнитный поток в приложенном преобразователе поле, имея на исходной стали близкие к нулю значения, возрастает при ее деформировании. При одних и тех же степенях деформации он оказывается наибольшим на образцах, изготовленных из внутренних слоев. Закалка наружных слоев при заводском выпуске листа проходит более интенсивно, вследствие чего ферромагнитная фаза образуется в них труднее. Самой интенсивной закалке подвергся тонкий лист стали, и образование в нем ферромагнитной фазы оказывается наиболее затрудненным. Соответственно имеет место уменьшение фиксируемого прибором магнитного потока. Измеряемая прибором ИОН-4 остаточная намагниченность при последовательных прокатках образует максимум, положение которого отражает начальное структурное состояние образца. С увеличением интенсивности закалки намагниченная зона растет медленнее, но и меньше размагничивается. В итоге крайнее левое положение по шкале деформаций занимает кривая для внутренних слоев стального листа толщиной 10 мм, а крайне правое – для листа толщиной 1 мм.

Кривые значений сигналов приборов МТЦ-3-2 и ИОН-4, полученные на подвергавшейся последовательной прокатке цельной плитке с начальной толщиной 10 мм, имеют в начале диапазона деформаций совпадение с кривыми для образцов из наружных слоев, далее – приближаются к кривым для внутренних слоев. Это связано с уменьшением толщины плитки и все большим попаданием внутренних слоев в информативную зону преобразователей приборов.

На рис. 3 представлены зависимости амплитуд вносимой ЭДС и сигналов прибора ПКТ-2 от толщины образцов, полученных из листа толщиной 1 мм, при разных степенях их пластической деформации.

Величины амплитуд E вносимой ЭДС возрастают с толщиной стопок пластинок из 1-мм листа и со степенью их деформации. Не показанные здесь кривые, характеризующие наружные слои 10-мм листа, значительно смещены по оси ординат вверх, а кривые для его внутренних слоев располагаются еще выше. Это связано с растущим при переходе к толстому листу и наиболее высоким в его глубинных структурах процентным содержанием ферромагнитного мартенсита деформации. Влияние толщины на измеряемый сигнал во всем диапазоне деформаций прекращается после 2÷3 мм.

Амплитуда третьей гармонической составляющей E_3 (показания ПКТ-2) демонстрирует после $\varepsilon \sim 20\%$ сильную зависимость от толщины образца, проявляющуюся в наибольшей мере в областях десятых долей миллиметра, в

которые попадают не наблюдаемые на графиках, ввиду отсутствия столь тонких образцов, перегибы кривых.

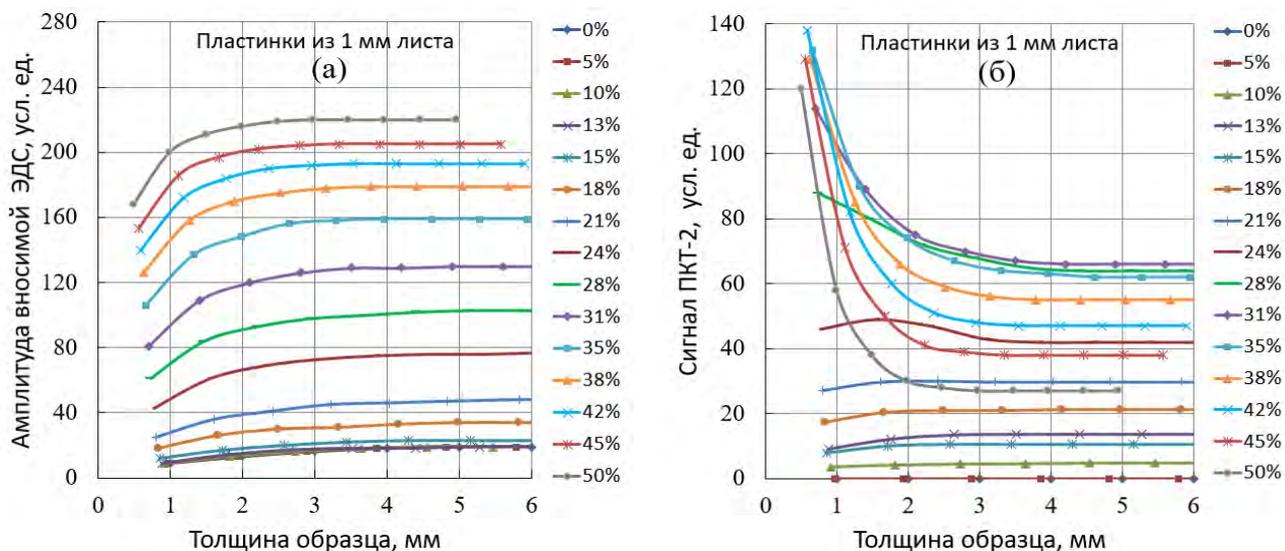


Рис. 3. Зависимости амплитуд вносимой ЭДС (а) и сигналов прибора ПКТ-2 (б) от толщины образцов, полученных из листа толщиной 1 мм, при степенях деформации $\varepsilon = 0 \div 50 \%$

При этом сигналы прибора ПКТ-2 для образцов с одинаковой степенью деформации, но изготовленных из тонкого листа, а также наружных и внутренних слоев толстого листа, приобретают в основном близкий ход и не изменяются после толщин, превышающих 2÷3 мм.

На рис. 4 изображены зависимости амплитуды вносимой ЭДС вихретокового преобразователя и измеренной прибором ПКТ-2 амплитуды третьей гармонической составляющей от степени деформации образцов из листа толщиной 1 мм, наружных и внутренних слоев листа толщиной 10 мм. Все они приведены к единой толщине образцов 4 мм и сравниваются с зависимостями, полученными при деформировании цельной плитки.

Рис. 4 показывает, что по мере роста степени деформации амплитуда вносимой ЭДС E увеличивается. Это объясняется возрастанием с увеличением ε начальной магнитной восприимчивости χ_{in} образцов за счет роста содержания в них ферромагнитной α -фазы. Снижение чувствительности E к изменениям ε в конце ее диапазона отражает уменьшение χ_{in} с возрастанием плотности дислокаций. Указанные процессы более значимо выражены во внутренних слоях толстого листа в силу их смягченной исходной закалки, а наиболее медленно протекают в интенсивно закаленном тонком листе. Особенно высокую чувствительность к характеру этих структур проявляет амплитуда третьей гармонической составляющей E_3 . Для всех трех кривых она демонстрирует на начальном участке шкалы деформаций рост, связанный с увеличением процентного содержания α -мартенсита. Такой ход зависимостей вытекает из прямой пропорциональности E_3 коэффициенту Рэлея β , который

возрастает с увеличением в материале количества ферромагнитной фазы. Прохождение максимума и уменьшение сигнала ПКТ-2 при превышении определенной степени деформации связано с уменьшением β из-за увеличения в образце плотности дислокаций. Наиболее активно эти процессы протекают во внутренних слоях толстолистовой стали, с повышением интенсивности закалки они замедляются. Зависимость, полученная на интенсивно закаленном листе исходной толщины 1 мм, имеет наименьший максимум, смещенный в область больших деформаций.

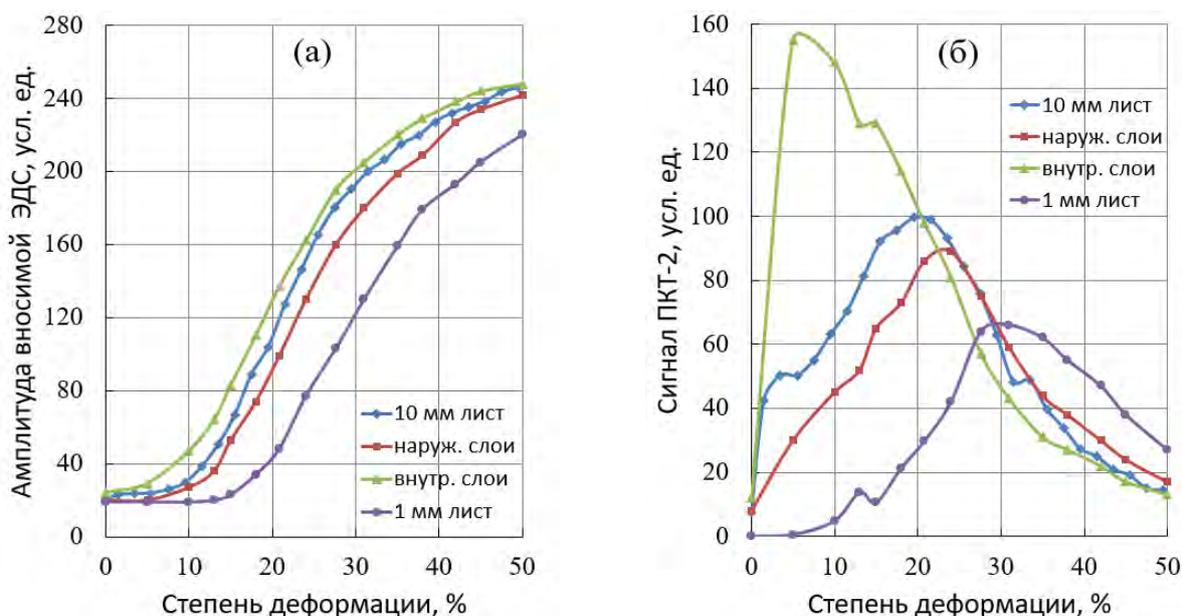


Рис. 4. Зависимости амплитуд вносимой ЭДС (а) и сигналов прибора ПКТ-2 (б) от степени деформации образцов из стальных листов толщиной 1 и 10 мм, наружных и внутренних слоев листа толщиной 10 мм

Кривые как для E , так и для E_3 на подвергавшейся деформации цельной толстой плитке занимают промежуточное положение между кривыми для материалов наружных и внутренних слоев. При этом высокий пик E_3 на рис. 3б в начале деформаций материала внутренних слоев оказывает смягчающее влияние на результаты измерений на поверхности плитки вследствие начальной большой удаленности ее середины от информативной зоны преобразователя.

Выводы. Полученные результаты показывают, что использованные магнитодинамические и электромагнитные приборы обладают высокой чувствительностью к содержанию ферромагнитной фазы и могут применяться для контроля процессов пластической деформации аустенитных сталей. При создании методик контроля конкретных изделий необходимо учитывать условия их изготовления, включая сведения о скорости охлаждения металла при его промышленном выпуске. Также следует иметь в виду, что структуры

внутри изделий могут обладать физическими свойствами, отличными от наружных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шарандо, В. И.** Использование магнитодинамического и термоэлектрического методов контроля при изучении процесса пластического деформирования стали 12X18H10T / В. И. Шарандо, А. В. Чернышев, Н. В. Кременькова // В сб. материалов Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии», 22–23 апреля 2021г., Белорусско-Российский ун-т, г. Могилев. – С.310-311.

2. **Шарандо, В. И.** Применение магнитодинамического метода контроля при изучении процессов деформации разнотолщинных листов стали 12X18H10T / В. И. Шарандо, А. В. Чернышев, Н. В. Кременькова, В. Д. Пиунов, А. А. Полоневич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2023, № 3. – С.19-25.

3. **Чернышев, А. В.** Использование вихретокового метода контроля при изучении процесса пластического деформирования стали 12X18H10T / А. В. Чернышев, В. И. Шарандо, Н. В. Кременькова // В сб. материалов Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии», 22–23 апреля 2021г., Белорусско-Российский ун-т, г. Могилев. – С.304-305.

4. **Чернышев, А. В.** Применение электромагнитных методов контроля при изучении процессов деформации разнотолщинных листов стали 12X18H10T / А. В. Чернышев, В. И. Шарандо, Н. В. Кременькова, И. Е. Загорский // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2023, № 4. – С.15-21.

5. Разработки лаборатории металлофизики ИПФ НАН Беларуси в области неразрушающего контроля [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://iaph.bas-net.by/lab1/products/> – Дата доступа: 20.06.2024.

6. **Гусак, Н. О.** Прибор для контроля твердости ПКТ-2 / Н. О. Гусак, А. В. Чернышев, В. Л. Цукерман // Дефектоскопия. – 1991, № 10. – С.2.

Контакты:

sharando@iaph.bas-net.by (Шарандо Владимир Иванович);

lab1@iaph.bas-net.by (Чернышев Алексей Всеволодович);

lab1@iaph.bas-net.by (Загорский Иван Евгеньевич);

lab1@iaph.bas-net.by (Полоневич Александр Антонович).