

Рисунок 6 – Классификация по методу К-средних изображения видимого диапазона

**Выводы.** Работа в тепловом диапазоне для классификации и распознавания состояния леса эффективнее видимых диапазонов видеосъемки, которые более пригодны для выделения типов поверхности и видов растительности, а также весьма зависимы от условий освещения и погоды.

Проведение, помимо пространственных, временных и сезонных измерений состояния лесного массива (в одинаковых стадиях вегетации), позволяет определять динамику развития его

негативных либо позитивных изменений, а также эффективность предпринимаемых природоохранных мер. Особенно наглядно и практически целесообразно составление ежегодных карт по описанным «индексам усыхания леса».

#### Литература

1. Беляев Б.И. Авиационный модульный комплекс мультиспектральной съемки земной поверхности «Мультискан» / Б.И. Беляев, А.В. Домарацкий, П.В. Ивуть, П.В. Кучинский, Э.И. Нестерович, А.Д. Хомицевич, А.В. Чумаков // Приборостроение–2019. Материалы 12-й Международной научно-технической конференции, 13–15 ноября 2019 г. – Минск, БНТУ–С. 452–453.
2. Решение о выдаче патента по заявке № 20200157, МПК G01N 21/01. Устройство для авиакосмической мультиспектральной съемки / А.В. Чумаков и др. – Дата подачи заявки – 18.06.2020 г.
3. Давидович Ю.С. Распознавание усыханий древесной растительности на аэрокосмических снимках / Ю.С. Давидович, Л.В. Катковский // Материалы республиканского научно-практического семинара студентов и молодых ученых, 13 ноября 2019. – Минск, БГУ. – 2019.

УДК 620.179.14

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 12X18N10T

Шарандо В.И., Чернышёв А.В., Кременькова Н.В.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время во многих отраслях машиностроения находят применение высоколегированные нержавеющие аустенитные стали. В исходном состоянии после закалки от температур 1 000–1 050 °С они имеют преобладающую парамагнитную  $\gamma$ -структуру, дополненную некоторым количеством ферромагнитной фазы, представленной  $\delta$ -ферритом. Механико-термическая обработка таких сталей приводит к формированию в структуре новой ферромагнитной  $\alpha$ -фазы – мартенсита [1–3]. При этом могут существенно изменяться эксплуатационные свойства изготовленных из этих материалов изделий, их контроль требует разработки и применения новых неразрушающих физических методов и методик.

В настоящей работе рассмотрена возможность применения для целей контроля структурных изменений в сталях аустенитного класса при их пластической деформации разработанных в Институте прикладной физики НАН Беларуси магнитодинамического толщиномера МТЦ-3, измерителя остаточной намагниченности ИОН-4 и прибора контроля твердости ПКТ-2. В качестве объекта контроля рассмотрена широко применяемая в промышленности сталь 12X18N10T.

Из стального листа толщиной 10 мм, находившегося в состоянии поставки (закалка от высоких температур), вырезаны плитки размером 21×21 мм<sup>2</sup>. Затем путём многократной прокатки при комнатной температуре во взаимно перпендикулярных направлениях обеспечены различные величины их пластической деформации.

В исследованиях использован толщиномер МТЦ-3 [4, 5], основанный на регистрации изменения магнитного потока в индукционной катушке, охватывающей стержневой магнит, при его контакте и затем удалении от ферромагнетика. Энергия магнита, выполненного из  $NdFeB$ , составляет 45 мДж. С помощью измерителя остаточной намагниченности ИОН-4 [5], использующего устанавливаемую на поверхность ферромагнетика и затем удаляемую от него катушку без магнита, определялся поток индукции от магнитного пятна, оставленного магнитным наконечником преобразователя толщиномера МТЦ-3 после его удаления от контролируемой поверхности. При этом величина измеряемого сигнала характеризует остаточную намагниченность контролируемой структуры. Исследования при переменном магнитном поле возбуждения производились с помощью

прибора ПКТ-2 [6]. Измерялась амплитуда третьей гармонической составляющей  $U_3$  выходной ЭДС накладного преобразователя. Она пропорциональна величине постоянной Релея  $\beta$ .

На рисунке 1 приведены в условных единицах зависимости показаний приборов МТЦ-3, ИОН-4 и ПКТ-2 от степени деформации образцов.

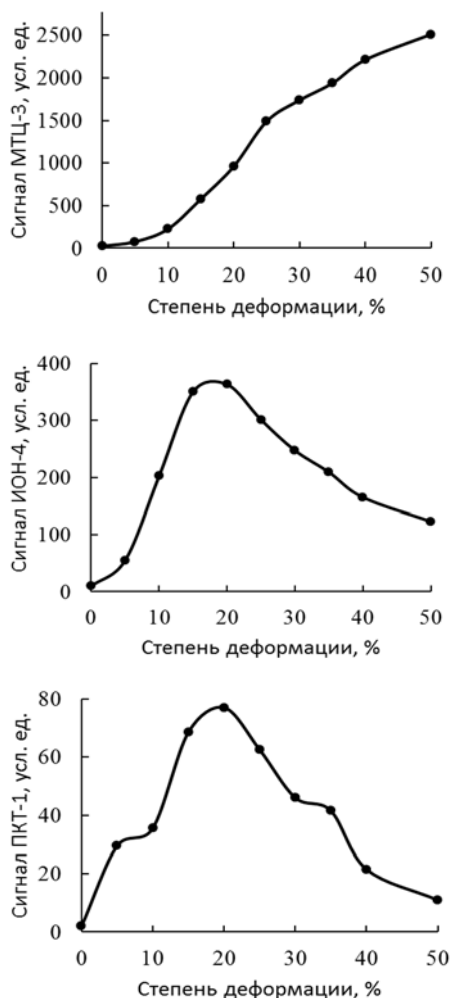


Рисунок 1 – Зависимости сигналов магнитодинамического толщиномера МТЦ-3, измерителя остаточной намагниченности ИОН-4 и прибора контроля твердости ПКТ-2 от степени деформации образцов из стали 12Х18Н10Т

Поскольку следствием прокатки было изменение от 10 до 5 мм толщины образцов (при сохранении их объема), оценено влияние на результаты измерений геометрического фактора. Ширина и глубина информативной зоны здесь должна быть намного большей, чем при работе с конструкционными сталями, вследствие меньшего количества и высокой разреженности ферромагнитной фазы. Эксперименты с наложением образцов друг на друга, действительно, показали существование этого эффекта при измерениях приборами МТЦ-3 и ИОН-4 на отдельных сла-

бомагнитных пластинках. В данном же конкретном случае было установлено, что ширина образцов вообще не сказывается на величине измеряемых сигналов, а уменьшение толщины может, вследствие одновременного быстрого нарастания количества и плотности магнитного материала, вызвать погрешности измерений не более 1 %. Для ПКТ-2 глубина информативной зоны не превышает нескольких сотен микрометров.

Кроме указанных исследований на всех образцах с помощью твердомера ТК-2М были выполнены измерения твердости. Полученные значения в единицах HRC показаны на рисунке 2.

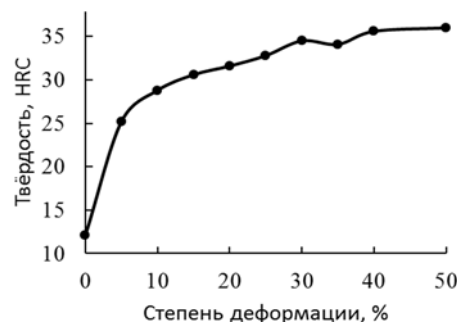


Рисунок 2 – Зависимость твердости по Роквеллу от степени деформации образцов из стали 12Х18Н10Т

Изменение сигнала МТЦ-3 указывает на непрерывный рост магнитного потока с увеличением степени деформации, что свидетельствует об интенсивном образовании магнитной фазы [1–3]; она может однозначно контролироваться с помощью данного прибора. Характерна неплохая корреляция полученной кривой с кривой изменения твердости (рисунок 2).

Измеряемая прибором ИОН-4 остаточная намагниченность ведёт себя более сложно: имеет ярко выраженный экстремум. Схожая зависимость от деформации величины коэрцитивной силы зафиксирована в работе [2]. Её авторы в качестве возможного объяснения этого эффекта рассматривают критерий энергетической выгоды образования конкурирующих однодоменных или многодоменных структур. В то же время снятая ими зависимость остаточной намагниченности от деформации такого перегиба не имеет. Поведение полученной нами кривой остаточной намагниченности можно связать с указанными в [2] факторами. Также следует учесть, что используемые нами приборы работают с расположенной у поверхности локальной информативной зоной; изменение количества и плотности магнитного материала в образце приводит к перераспределению её намагниченности за счёт замыкания на глубинные объёмы.

Поведение кривой, полученной с помощью прибора ПКТ-2, обусловлено тем, что амплитуда

$U_3$  прямо пропорциональна постоянной  $\beta$ , характеризующей нелинейные необратимые процессы намагничивания. Первоначальный рост  $U_3$  при увеличении степени пластической деформации образца вызван формированием в нем ферромагнитной фазы. После достижения максимального значения  $U_3$  переходит к снижению, так как с ростом степени пластической деформации начинает уменьшаться величина  $\beta$ .

Из полученных результатов следует, что контроль степени механической обработки, количества создаваемой ею ферромагнитной фазы, а также твердости изделий из стали 12X18H10T на технологически известных участках диапазона пластической деформации до и после 20 % может осуществляться с помощью любого из трёх рассмотренных приборов. При этом прибор контроля твердости ПКТ-2, создающий наименьший объем информативной зоны, применим к более мелким изделиям. Контроль во всем диапазоне деформаций 0–50 % возможен только с помощью магнитодинамического толщиномера МТЦ-3. Процесс измерений этим прибором характеризуется простотой, при этом обеспечивается высокая чувствительность и стабильность получаемых результатов.

УДК 678.07

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОК НАНОКОМПОЗИТОВ И ПОЛИОКСИБУТИРАТА МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Ширяева В.Д.<sup>1</sup>, Щербакова Е.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт химии новых материалов НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Магнитные наночастицы (НЧ) оксидов железа в составе композитов благодаря своим магнитным свойствам, таким как низкая коэрцитивность, высокая намагниченность насыщения и низкая температура Кюри, а также чрезвычайно низкая токсичность и биосовместимость, считаются одними из наиболее подходящих материалов для использования в медицине. В частности, композиты на их основе перспективны для биомедицинских применений в качестве инструмента для адресной доставки лекарств [1].

Пленки полиоксибутирата (ПОБ) используются в медицине для создания тканей, основанных на биоразлагаемых полимерах и имеющих форму замещаемого органа, для изготовления рассасывающихся шовных нитей, хирургических пластин, остеопротезов и имплантатов с возможностью постепенного замещения соединительной тканью организма [2, 3].

В настоящей работе для исследования образцов использовался метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе

## Литература

1. Снежной Г.В. Идентификация низких содержания феррита и мартенсита в аустенитных хромоникелевых сталях // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 7. – С. 76–79.
2. Горкунов Э.С. Влияние деформации прокаткой и одноосным растяжением на структуру, магнитные и механические свойства армо-железа, стали 12X18H10T и составного материала «сталь 12X18H10T – армо-железо–сталь 12X18H10T» / Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Коковихин Е.А., Туева Е.А. (Путилова), Субачев Ю.В., Горулева Л.С., Подкорытова А.В. // *Дефектоскопия*. – 2011. – № 6. – С. 16–30.
3. Лухвич А.А. Выявление ферромагнитной составляющей в нержавеющей сталях магнитодинамическим методом. / А.А. Лухвич, В.И. Шарандо, А.К. Шукевич, К.И. Янушкевич // *Дефектоскопия*. – 2015. – № 3. – С. 3–10.
4. Лухвич А.А. Магнитные толщиномеры нового поколения // *Не разрушающий контроль и диагностика*. – 2010. – № 4. – С. 3–15.
5. Разработки лаборатории металлофизики ИПФ НАН Беларуси в области неразрушающего контроля [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://iaph.basnet.by/lab1/products/> – Дата доступа: 07.10.2020.
6. Гусак Н.О. Прибор для контроля твердости ПКТ-2 / Н.О. Гусак, А.В. Чернышев, В.Л. Цукерман // *Дефектоскопия*. – 1991. – № 10. – С. 92.

JSM6000 (JEOL, Япония). Изображения СЭМ получены в режиме высокого вакуума при ускоряющем напряжении 15 кВ.

Сканирующая электронная микроскопия широко используется для диагностики наноматериалов и наноструктур, так предел разрешения СЭМ приближается к нескольким нанометрам. Кроме того, с помощью АСМ определяют химический состав приповерхностной области. Достоинством СЭМ является возможность определения количественного и качественного химического состава образца.

Пленки ПОБ получали нанесением раствора полиоксибутирата в хлороформе методом спинкоутинга – это метод нанесения частиц или тонких пленок на плоские подложки за счет центрифугирования и растекания раствора прекурсора по поверхности образца.

Нанесение осуществлялось на 2 вида шаблонов: линейный и квадратный. Результаты исследований на СЭМ представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.