

УДК 534.16

**ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕМНОЙ СТРУКТУРЫ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ*****В. И. ПУДОВ, Ю. Н. ДРАГОШАНСКИЙ***

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН

Екатеринбург, Россия

UDC 534.16

**RESEARCH OF VOLUME STRUCTURE OF SOFT MAGNETIC MATERIALS BY THE OPTICAL METHOD*****V. I. PUDOV, YU. N. DRAGOSHANSKY***

**Аннотация.** В результате применения разработанной бинокулярной оптической системы исследована магнитная доменная структура одновременно на двух противоположных поверхностях трансформаторной ленты с ребровой (110)[001] и кубической (100)[001] текстурами сплава Fe – 3 % Si. Выявлены формирование многофазной структуры замыкающих доменов и сложная картина перестройки доменов при произвольной ориентации магнитного поля.

**Ключевые слова:** бинокулярная оптическая система, объемный вид и динамика доменов.

**Abstract.** As a result of the application of the developed binocular optical system, the magnetic domain structure was studied simultaneously on two opposite surfaces of the transformer tape with ribbed (110)[001] and cubic (100)[001] textures of the Fe-3%Si alloy. The formation of a multiphase structure of closure domains and a complex pattern of domain rearrangement for an arbitrary orientation of the magnetic field are revealed.

**Keywords:** binocular optical system, volumetric view and domain dynamics.

Уровень физических свойств твердых тел существенно зависит от состояния их кристаллической структуры, наличия в ней различных неоднородностей химического состава, внутренних напряжений, разных включений, шероховатости поверхности. В частности, в ферромагнитных трансформаторных сталях Fe – 3 % Si и сплавах при намагничивании уровень их магнитных характеристик в значительной мере определяется взаимодействием движущихся границ магнитных доменов с этими структурными неоднородностями. Эта связь динамики магнитных доменов с неоднородностями структуры металлов и сплавов служит надежной основой их магнитной структуроскопии [1].

**Методы магнитной структуроскопии металлов и сплавов.** Среди методов магнитной структуроскопии широко используется оптический мониторинг поверхности твердых тел с использованием различного вида оптических микроскопов. Они позволяют, например, в магнитомягких материалах исследовать динамику магнитной структуры при различных внешних воздействиях (механические деформации, термообработка, намагничивание, облучение) в целях улучшения структуры и свойств материалов. Так как наиболее массовые магнитомягкие сплавы и электротехнические стали (ЭТС) широко используются

в качестве магнитопроводов в виде тонких листов и лент, то наиболее достоверным и информативным может быть исследование их структуры в одних и тех же участках материала на двух противоположных его поверхностях одновременно.

Для этой цели создали устройство [2] на основе двух взаимосвязанных оптических систем, расположенных на общей станине 1 (рис. 1).

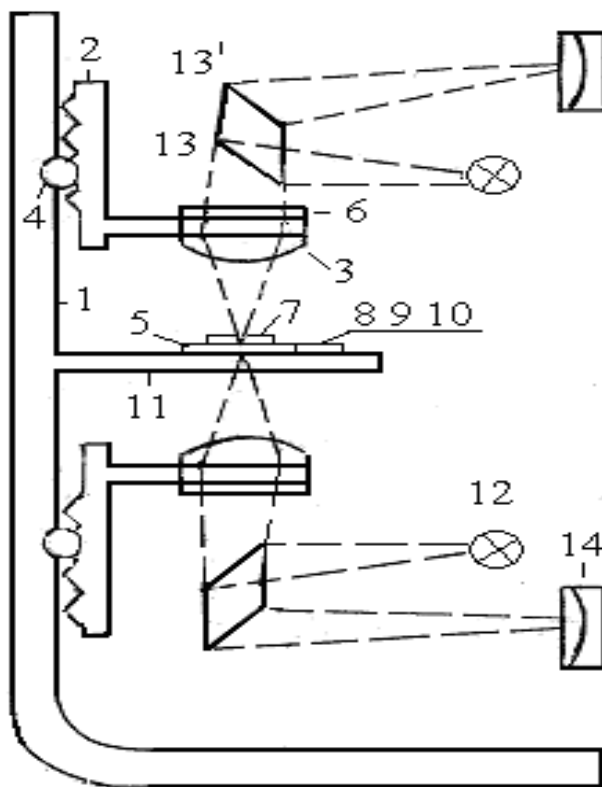


Рис. 1. Схема устройства для оптического мониторинга двух поверхностей ленточного образца трансформаторной стали

Устройство снабжено двумя кольцевыми постоянными магнитами 6, перемещаемыми вдоль объективов 3, а также устройством для растяжения 7 и перемещения исследуемых листовых образцов 8–10 сплавов, располагаемых между объективами. Обе системы состоят из одинаковых оптических элементов – объективов, окуляров 14, источников света 12, светопреломляющих призм 13, 13', зубчато-винтовых механизмов фокусировки 4. Они расположены в вертикальной плоскости параллельно одна относительно другой, причем их объективы установлены соосно и направлены линзами навстречу друг другу.

Новое устройство создает возможность исследования кристаллической и магнитной структур и их изменений одновременно в двух противоположных слоях одного и того же участка металлического образца, а при его малых толщинах (0,30...0,05 мм для ЭТС) позволяет достаточно достоверно прогнозировать вид структуры и внутри образца. Помимо того, становится возможным определять оптимальные режимы обработок, места зарождения основных и замыкающих доменов, распределение и условия сквозного прохождения их границ, физические механизмы изменения параметров доменов

при различных деформационно-текстурирующих воздействиях с улучшением магнитных свойств материала.

В результате мониторинга поверхности лент сплава Fe – 3 % Si установлено, что сквозная магнитная структура из основных полосовых  $180^\circ$  доменов формируется при толщине кристалла порядка ширины этих доменов, для замыкающих доменов – порядка их длины. Обнаружено сложное комплексное  $180\text{--}90$ -градусное строение замыкающих доменных структур в объеме кристаллов (рис. 2). Управление их параметрами позволяет снижать магнитные потери при растяжении или локальной лазерной обработке стали и трансформаторных магнитопроводов [3–7].

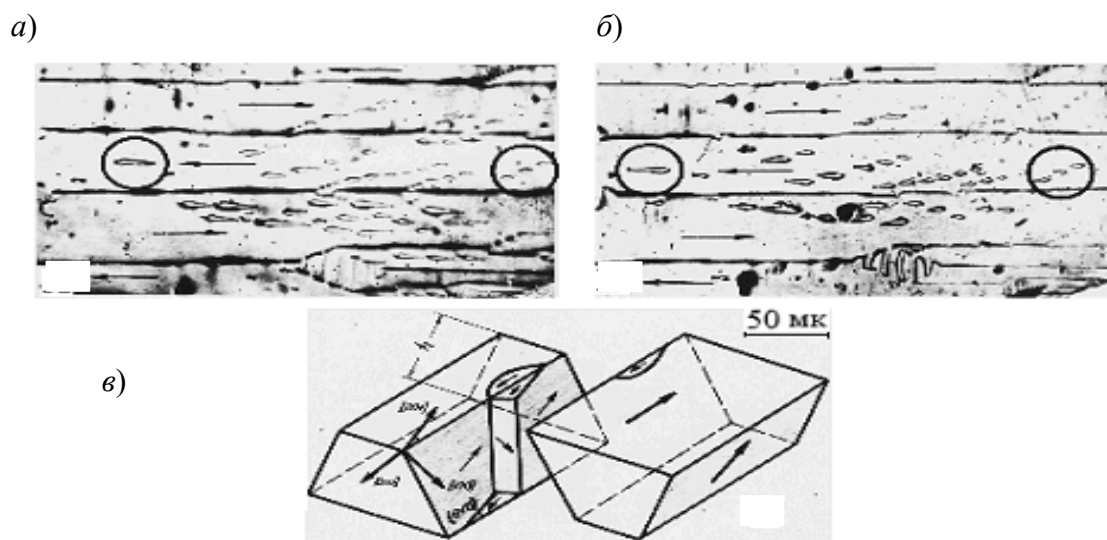


Рис. 2. Вид сквозной магнитной структуры на верхней (а) и нижней (б) поверхностях кристалла стали и объемная схема  $180^\circ\text{...}90^\circ$  комплексов замыкающих доменов (в)

Изучение доменной структуры в сплаве Fe – 3 % Si типа  $(110)[001]$  одновременно на двух противоположных его поверхностях (рис. 3, а, б) позволило также определить объемный вид доменов в процессе их сложной перестройки при намагничивании под разными углами к оси легкого намагничивания (ОЛН), например, под углом  $25^\circ$ .

В этом случае вначале происходит постепенное вытеснение исходной полосовой структуры  $180^\circ$  доменов 1 типа А системой узких внутриобъемных  $90^\circ$  доменов 2 типа С, намагниченных вдоль двух других ОЛН кристалла –  $[010]$  и  $[100]$ . Магнитный поток доменов 2 новой структуры замыкается вблизи поверхностей кристалла через систему дополнительных трапециевидных доменов 3 (рис. 3, в).

Дальнейшее увеличение поля приводит к росту тех доменов 2 структуры типа С, намагниченность которых ближе к направлению действующего поля  $H$ , чем намагниченность в соседних доменах.

Аналогичное объемное строение замыкающей структуры доменов типа С обнаружено и вблизи достаточно крупных локальных дефектов в кристаллах

сплава Fe – 3 % Si, поверхности которых составляют значительные углы с ОЛН (рис. 4).

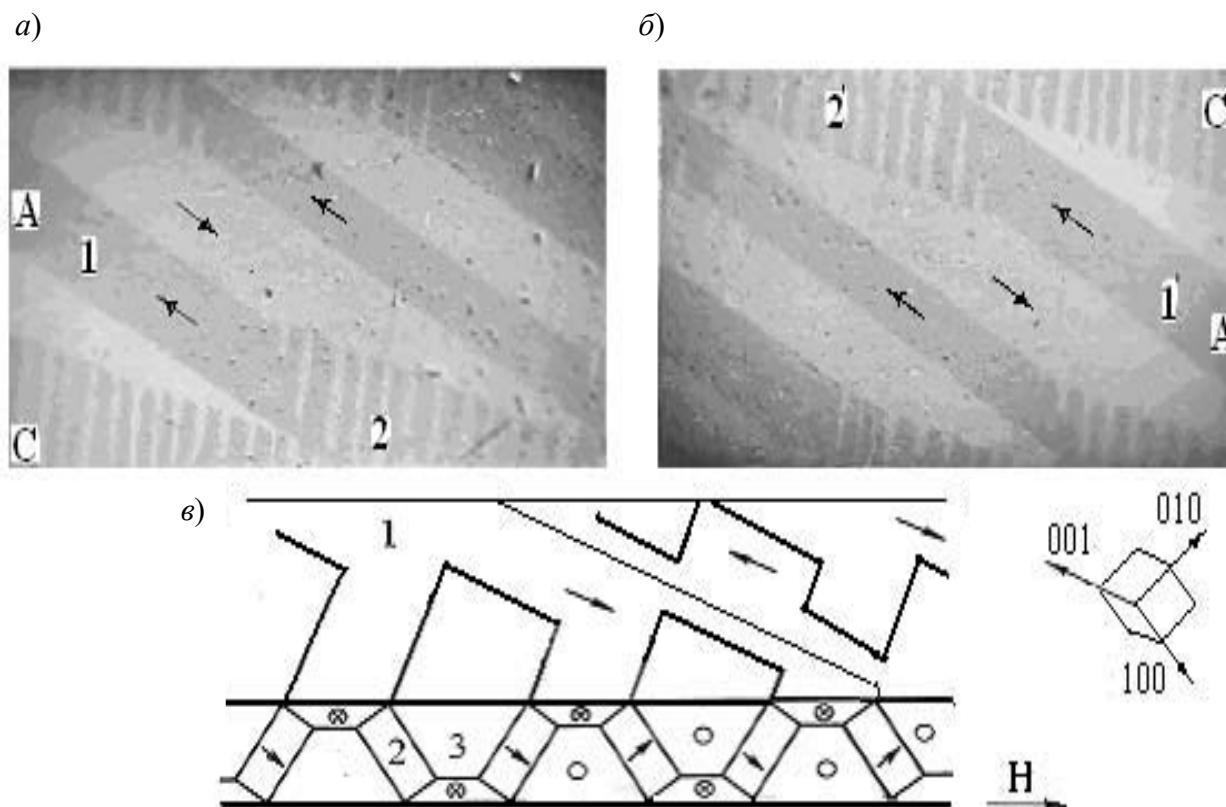


Рис. 3. Вид доменов типа А и С кристалла Fe – 3 % Si при намагничивании; H → направление поля

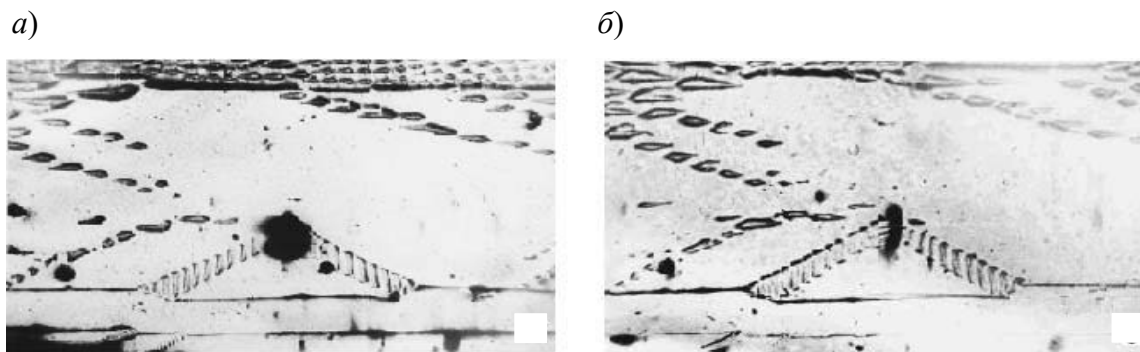


Рис. 4. Вид сквозной замыкающей доменной структуры при сквозном дефекте на верхней (а) и нижней (б) поверхностях кристалла

Наличие  $90^\circ$  доменов в таких замыкающих структурах затрудняет смещение границ доменов при намагничивании и увеличивает линейную магнитострикцию сплава. Нанесение магнитоактивных (растягивающих металл) электроизоляционных покрытий переводит эти домены типа С в менее вредные клиновидные  $180^\circ$  субобласти.

**Заключение.** Представленное оптико-магнито-механическое устройство существенно повышает уровень и качество исследования кристаллической и

магнитной структур и их изменений, причем одновременно в двух противоположных слоях и в объеме металлического образца. При этом технический результат направлен также на перспективность снижения трудоемкости, повышения информативности исследований, на расширение областей практического использования устройства.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Магнит», № 122021000034-9, и тема «Диагностика», № 122021000030-1).*

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горкунов, Э. С.** Влияние структуры сталей на процессы перемангничивания и решение задач магнитной структуроскопии / Э. С. Горкунов, Ю. Н. Драгошанский, С. С. Родионова // Дефектоскопия. – 1998. – № 6. – С. 42–59.
2. Устройство для оптического мониторинга поверхностей твердых тел: пат. RU 174673 / Ю. Н. Драгошанский, В. И. Пудов. – Оpubл. 25.10.2017.
3. Magnetic properties and dynamic domain behavior in grain-oriented 3 % Si – Fe / T. Nozawa [et al.] // IEEE Trans. Magn. – 1996. – Vol. 32, № 2. – P. 572–589.
4. **Dragoshanskii, Yu. N.** Effect of laser treatment stress on the magnetic properties of grain-oriented electrical steel / Yu. N. Dragoshanskii, L. S. Karenina, V. I. Pudov // Актуальные проблемы прочности: материалы 53 Междунар. конф. – Витебск, 2012. – Ч. 1. – С. 231–233.
5. **Драгошанский, Ю. Н.** Улучшение магнитной структуры и свойств магнитомягких сплавов при модификации их поверхности / Ю. Н. Драгошанский, В. И. Пудов // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – № 3. – С. 48–52.
6. Способ изготовления анизотропной электротехнической стали: пат RU 2569260 / В. И. Пудов, Ю. Н. Драгошанский. – Оpubл. 20.11.2015.
7. **Пудов, В. И.** Доменная структура и магнитные потери шихтованных магнитопроводов при лазерной обработке / В. И. Пудов, Ю. Н. Драгошанский // Физика металлов и металлургия. – 2015. – Т. 116, № 6. – С. 571–576.

E-mail: pudov@imp.uran.ru drago@imp.uran.ru