

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ $(\text{Sm,Zr})(\text{Co,Cu,Fe})_z$

С.Ораби, М.Б.Ляхова, Ю.Е.Пушкарь, Д.Д.Мишин

Как известно, сплавы $(\text{Sm,Zr})(\text{Co,Cu,Fe})_z$ широко используются в качестве материалов для постоянных магнитов (ПМ) с высокими значениями магнитной энергии и параметров температурной стабильности характеристик. В настоящее время существует обширное количество результатов экспериментальных исследований структуры и магнитных свойств ПМ данного типа, однако для расширения представлений о процессах формирования в них высококоэрцитивного состояния актуальными являются дальнейшие исследования в данном направлении.

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей процессов перемагничивания литых и спеченных постоянных магнитов типа $(\text{Sm,Zr})(\text{Co,Cu,Fe})_z$ при воздействии внешних магнитных полей под углом к оси легкого намагничивания (ОЛН).

Исследования проведены на литых образцах, представляющих собой одно зерно сплава, и спеченных постоянных магнитах. Образцы имели форму сфер диаметром 2–3 мм. Магнитные измерения проведены методом вибрационного магнитометра в открытой магнитной цепи в полях до 30 кЭ. Относительная погрешность измерения удельной намагниченности составляла $\pm 1.5\%$ по отношению к эталонному образцу из отожженного никеля, погрешность измерения поля не превышала 3%. Намагничивание образцов осуществлялось в импульсных полях до 100 кЭ.

Исходные сплавы выплавлялись методом высокочастотной индукционной плавки. Спеченные магниты получали традиционными методами порошковой металлургии, включающими в себя измельчение слитков, прессование порошка в ориентирующем магнитном поле и спекание заготовок в вакууме. Гомогенизация образцов проводилась в течение 3 ч при температурах 1165 – 1170° С. Для достижения высококоэрцитивного состояния образцы подвергались термическим обработкам (ТО) по двум режимам: изотермический отжиг при 800° С с закалкой от температуры отжига (ТО-1) и охлаждением в интервале температур 800 – 400° С со средней скоростью 2° С/мин (ТО-2). Длительность отжига в обоих случаях составляла 2, 5, 10 и 20 ч.

В качестве объектов исследования были выбраны сплавы состава $\text{Sm}_{0.85}\text{Zr}_{0.15}(\text{Co}_{0.70}\text{Cu}_{0.09}\text{Fe}_{0.21})_z$, где $z = 6.1, 6.4, 6.7$. Выбор такого химического состава исследованных сплавов был обусловлен тем, что по данным работы [1] в указанном интервале стехиометрических соотношений z фазовый состав и гистерезисные характеристики ПМ изменяются в широких пределах. Составы сплавов для ПМ имели более низкие значения $z = 5.9, 6.1, 6.4$, поскольку в процессе технологического цикла получения спеченных постоянных магнитов часть самария теряется на окисление и испарение и стехиометрическое соотношение готовых образцов повышается по отношению к z исходного сплава.

На рис. 1 приведены концентрационные зависимости величины коэрцитивной силы литых и порошковых ПМ $\text{Sm}_{0.85}\text{Zr}_{0.15}(\text{Co}_{0.70}\text{Cu}_{0.09}\text{Fe}_{0.21})_z$, прошедших термические обработки различной длительности по режимам ТО-1 и ТО-2. Необходимо отметить, что данные зависимости для литых

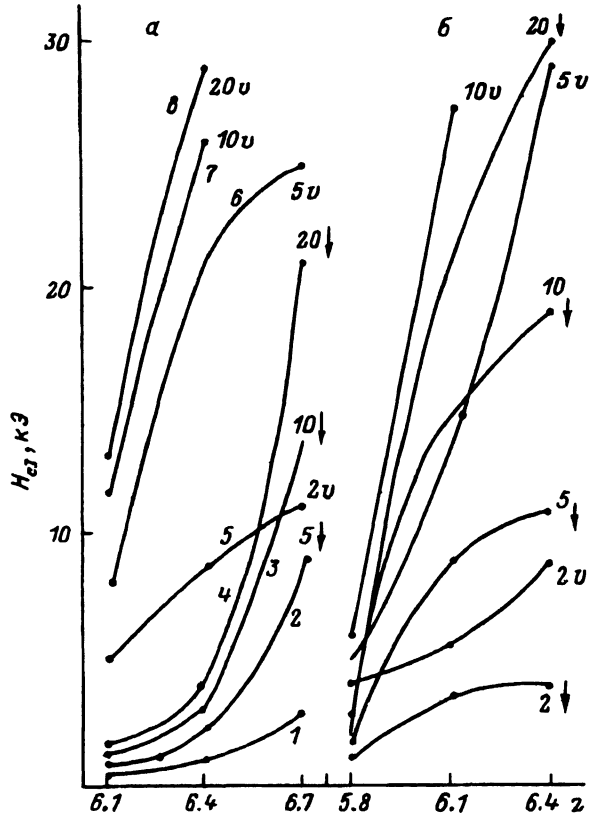


Рис. 1. Концентрационные зависимости коэрцитивной силы H_c литых (а) и порошковых (б) ПМ после ТО-1 (1-4) и ТО-2 (5-8) длительностью 2 (1,5), 5 (2,6), 10 (3,7), 20 ч (4,8).

и порошковых ПМ практически аналогичны [2]. Для литых ПМ с $z = 6.1$ и порошковых ПМ с $z = 5.8$ изотермический отжиг ТО-1 длительностью до 20 ч позволяет реализовать величину коэрцитивной силы не более 3 кЭ, а проведение медленного охлаждения ТО-2 сопровождается ростом H_c до 8-13 кЭ. Величина коэрцитивной силы литых ПМ с $z = 6.4$ не превышает 5 кЭ после 20-часового отжига по режиму ТО-1, а медленное охлаждение от 800°C повышает $H_c > 20$ кЭ уже после отжига в течение 5 ч. При высоких z коэрцитивная сила порошковых ПМ достигает значений выше 20 кЭ уже после ТО-1, для ПМ с $z = 6.4$ $H_c > 30$ кЭ реализуется после отжига при 800°C в течение 20 ч. В случае проведения ТО-2 величина $H_c > 25$ кЭ достигается после 10-часового отжига для ПМ с $z = 6.4$ и 5-часового отжига для ПМ с $z = 6.4$.

Для всех исследованных образцов ПМ построены угловые зависимости коэрцитивной силы (рис. 2, 3). Перед каждым измерением образцы намагничивались до насыщения вдоль ОЛН (для ПМ вдоль оси текстуры). Угол φ принимал значения от 0 до 90° и представлял собой угол между ОЛН и направлением размагничивающего магнитного поля. Коэрцитивная сила определялась как величина размагничивающего поля, при котором проекция удельной намагниченности на направление поля равна нулю.

Полученные для литых и порошковых ПМ результаты в основном аналогичны. Для литых ПМ с $z = 5.8$ и порошковых ПМ с $z = 6.1$ угловые зависимости коэрцитивной силы имеют экстремальный ход.

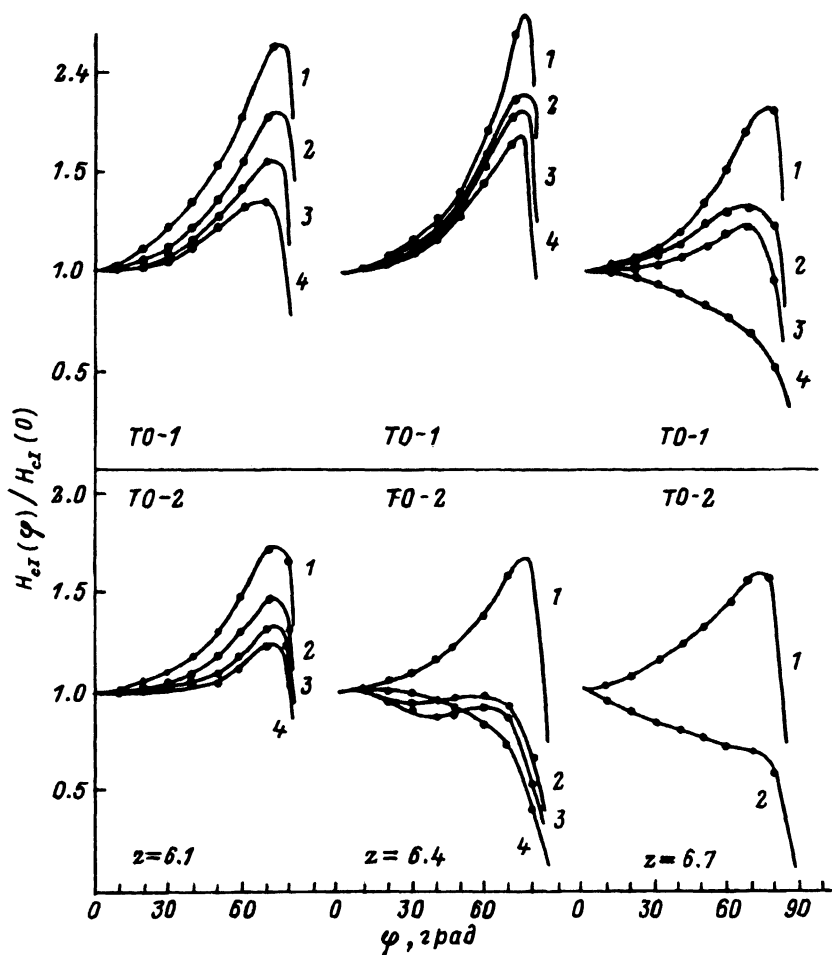


Рис. 2. Угловые зависимости коэрцитивной силы литых ПМ $\text{Sm}_{0.85}\text{Zr}_{0.15}(\text{Co}_{0.70}\text{Cu}_{0.09}\text{Fe}_{0.21})_z$ после ТО в течение 2 (1), 5 (2), 10 (3), 20 ч (4).

При увеличении длительности как ТО-1, так и ТО-2 величина максимума на кривых ${}_1H_c(\varphi)$ снижается, а наибольшая величина коэрцитивной силы для всех обработок достигается при $\varphi \sim 70^\circ$. Совпадение экспериментальных кривых ${}_1H_c(\varphi)$ с ходом зависимости $H_c(\varphi) = H_c(0)/\cos \varphi$, которая характерна для механизма задержки смещения доменных границ, наблюдается только при небольших углах $\varphi = 0-30^\circ$.

Характер угловых зависимостей коэрцитивной силы ПМ с большими z ($z = 6.4$ для порошковых и $z = 6.7$ для литых ПМ) существенно зависит от длительности ТО. Образцы, прошедшие отжиги небольшой длительности (2 ч для ТО-2 и 2-5 ч для ТО-1), характеризуются экстремальными кривыми ${}_1H_c(\varphi)$. После более длительных отжигов угловые зависимости коэрцитивной силы ПМ имеют монотонно убывающий характер.

Кроме угловых зависимостей коэрцитивной силы в настоящей работе исследовались полные и частные петли гистерезиса как литых, так и спеченных постоянных магнитов $(\text{Sm}, \text{Zr})(\text{Co}, \text{Cu}, \text{Fe})_z$ при воздействии внеш-

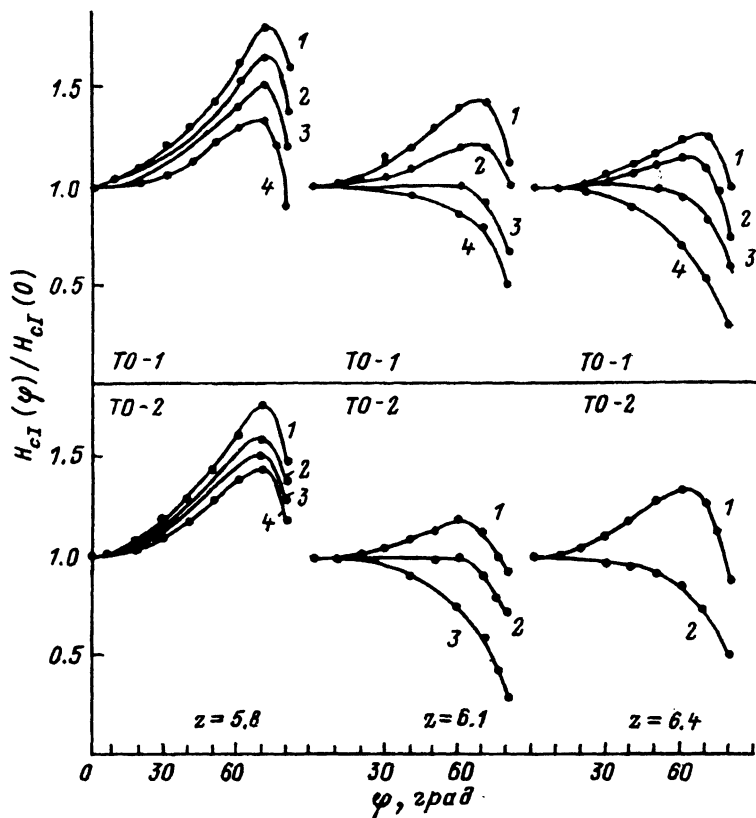


Рис. 3. Угловые зависимости коэрцитивной силы порошковых ПМ $\text{Sm}_{0.85}\text{Zr}_{0.15}(\text{Co}_{0.70}\text{Cu}_{0.09}\text{Fe}_{0.21})_z$ после ТО в течение 2 (1), 5 (2), 10 (3), 20 ч (4).

него магнитного поля под углом φ к ОЛН. На рис. 4–6 в качестве примера приведены результаты магнитных измерений для литых образцов, прошедших 5-часовой отжиг по режимам ТО-1 и ТО-2.

Кривые 1 на рис. 4–6 представляют собой проекции $I H_c(\varphi)$ на направление ОЛН, т.е. внешнее магнитное поле, под действием которого в образцах проходят процессы смещения доменных границ. По кривым 2 и размагничивающим частям петль гистерезиса (рис. 4–6) построены угловые зависимости остаточной (вдоль ОЛН) намагниченности образцов, размагниченных под углом φ (кривые 3 на рис. 4–6). Кривые 2 (рис. 4–6) — экспериментальные зависимости остаточной (вдоль ОЛН) намагниченности для образцов, размагниченных полем $H = I H_c(\varphi)$ под углом.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы. Для всех образцов при углах $\varphi \geq 80^\circ$ кривые 2 достигают значений остаточной намагниченности образцов в состоянии после снятия намагничивающего до насыщения поля. Следовательно, можно утверждать, что в этом случае размагничивание образцов достигается исключительно за счет обратимого вращения вектора намагниченности. Высокие значения остаточной намагниченности на кривых 2 и ход угловых зависимостей коэрцитивной силы свидетельствуют о том, что процессы обрати-

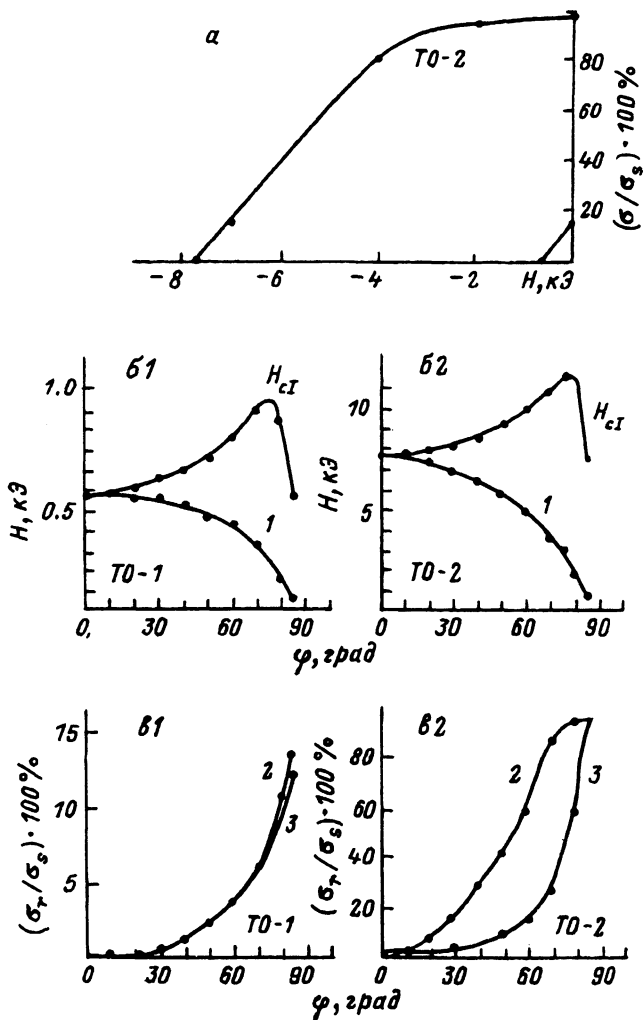


Рис. 4. Размагничивающие части петель гистерезиса (а), угловые зависимости коэрцитивной силы (б) и остаточной намагниченности (в) образцов сплава $\text{Sm}_{0.85}\text{Zr}_{0.15}(\text{Co}_{0.70}\text{Cu}_{0.09}\text{Fe}_{0.21})_{6.1}$ после ТО длительностью 5 ч.

мого вращения J_s происходят при углах $\varphi > 30^\circ$ во всех исследованных образцах.

Как видно из рис. 4–6, в, ход кривых 2 и 3 для большинства образцов практически совпадает. Интересный результат получен для образцов с $z = 6.1$ и 6.4 после ТО-2 (рис. 4–5, в2): ход расчетных кривых 2, при построении которых учитывались только процессы смещения доменных границ, и экспериментальных кривых 3 существенно различен. В этих случаях при воздействии размагничивающего поля $H = {}_I H_c(\varphi)$ под углом φ к ОЛН в образцах перемагничивается значительно больший объем (кривые 3), чем это возможно за счет смещения доменных границ при приложении вдоль ОЛН поля, равного проекции ${}_I H_c(\varphi)$ (кривые 2). По

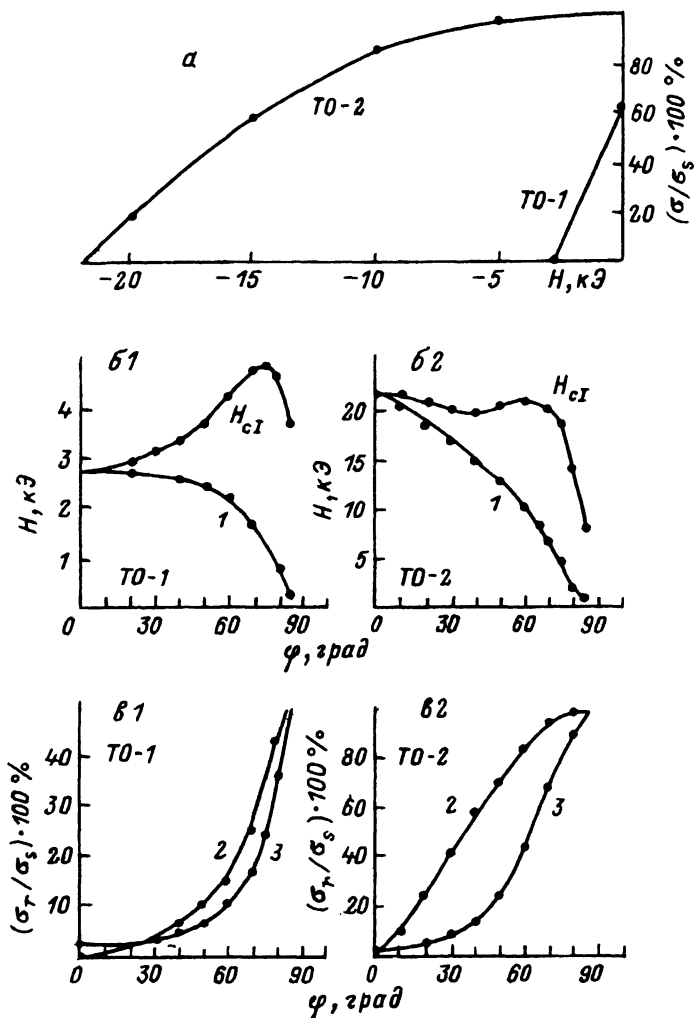


Рис. 5. Размагничивающие части петель гистерезиса (а), угловые зависимости коэрцитивной силы (б) и остаточной намагниченности (в) образцов сплава $\text{Sm}_{0.85}\text{Zr}_{0.15}(\text{Co}_{0.70}\text{Cu}_{0.09}\text{Fe}_{0.21})_{6.4}$ после ТО длительностью 5 ч.

всей видимости, в данных образцах при перемагничивании происходят процессы необратимого вращения вектора намагниченности.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что в постоянных магнитах $(\text{Sm}, \text{Zr})(\text{Co}, \text{Cu}, \text{Fe})_z$ при воздействии внешнего магнитного поля под углом к ОЛН наряду со смещением доменных границ происходят процессы как обратимого, так и необратимого вращения вектора намагниченности.

Самостоятельным является вопрос о фазовых составляющих исследуемых сплавов, в которых происходят процессы вращения \mathbf{J}_s . К наиболее низкоанизотропным составляющим можно, например, отнести центральные области "ячеек" тонкой структуры сплавов $(\text{Sm}, \text{Zr})(\text{Co}, \text{Cu}, \text{Fe})_z$, поскольку они по стехиометрии близки к $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ и обогащены желе-

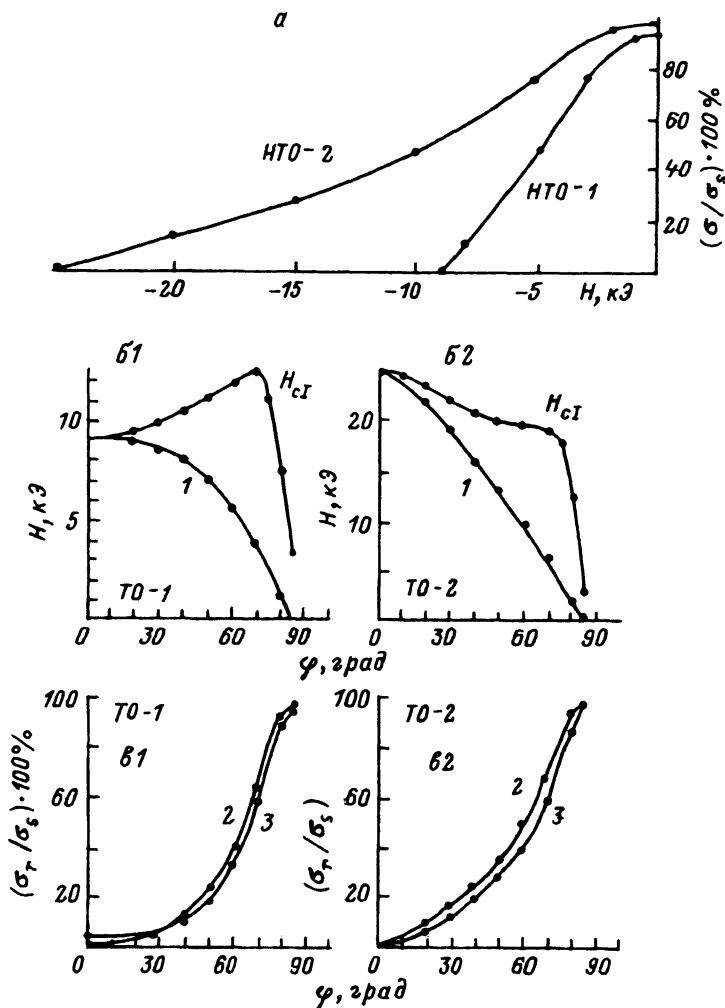


Рис. 6. Размагничивающие части петель гистерезиса (а), угловые зависимости коэрцитивной силы (б) и остаточной намагниченности (в) образцов сплава $\text{Sm}_{0.85}\text{Zr}_{0.15}(\text{Co}_{0.70}\text{Cu}_{0.09}\text{Fe}_{0.21})_{6.7}$ после ТО длительностью 5 ч.

зом. Однако для детального обсуждения этого вопроса требуется проведение дальнейших исследований с применением высокоразрешающих структурных методов.

Список литературы

- [1] Левандовский В.В., Шаморикова Е.Б., Егоров С.М., Бабушкин Ю.В. // Физика магнитных материалов. Калинин, 1986. С. 44–52.
- [2] Русанов О.И., Пушкарь Ю.Е., Ляхова М.Б., Гусева Н.Н. // Физика магнитных материалов. Тверь, 1990. С. 81–93.

Тверской университет

Поступило в Редакцию
17 июля 1992 г.