ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2022, том 86, № 9, с. 1288–1291

УДК 537.62:621.31

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ В РОТОРАХ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

© 2022 г. И. М. Миляев[1], С. Ю. Останин[2, *], Д. В. Михеев[2], Н. С. Зубарев[2], Цуй Шумэй[3], Чжу Чунбо[3]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова", Москва, Россия

[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

[3]Харбинский политехнический университет, Харбин, Китай

*E-mail: OstaninSY@mpei.ru

Поступила в редакцию 18.04.2022 г.
После доработки 13.05.2022 г.
Принята к публикации 23.05.2022 г.

Изучены вопросы формирования оптимальных гистерезисных свойств и характеристик в материалах для роторов гистерезисных электромеханических преобразователей энергии и непосредственно в роторах. Исследовано влияние напряженности магнитного поля, создаваемого при термомагнитной обработке материалов и роторов, на параметры цикла гистерезиса базовых хромокобальтовых сплавов.

DOI: 10.31857/S0367676522090198

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуально решение перспективных задач в области энергоэффективности, энергосбережения и ресурсосбережения в химической, текстильной, атомной, медицинской, пищевой промышленности [1–9] средствами базовых технологий силовой электротехники. Одно из важных направлений решения этих задач – обеспечение работы технологических и производственных механизмов в режиме электрического синхронного вала, для обеспечения которого в силу физической природы своей работы оптимальны гистерезисные электромеханические преобразователи энергии в режиме синхронного гистерезисного электродвигателя [1–9]. Ключевым направлением совершенствования таких электродвигателей является получение оптимальных магнитных свойств у материалов, из которых выполняются роторы электродвигателей, и непосредственно у роторов. В связи с этим актуально решение следующих задач, обеспечивающих достижение цели исследования:

– изучение электромагнитных процессов в магнитных цепях гистерезисных электродвигателей различных конструкционных реализаций;

– создание магнитных материалов и сплавов для роторов гистерезисных электродвигателей с улучшенными магнитными и гистерезисными свойствами, являющихся менее дефицитными и недорогими;

– получение новых режимов и средств термомагнитной обработки хромокобальтовых сплавов и роторов из них; эта обработка является перспективным направлением получения оптимальных магнитных и гистерезисных свойств и характеристик материалов и гистерезисных роторов;

– конструкционные улучшения гистерезисных электродвигателей и их роторов на основе применения усовершенствованных и новых сплавов.

Принципиальные основы технологии термомагнитной обработки хромокобальтовых сплавов и ключевые подходы к ее осуществлению рассмотрены в ряде справочников и научных статей по магнитно-твердым материалам и сплавам [10–15], а также в ГОСТ 24897-81. В этих справочниках и статьях рассмотрены в основном режимы термической обработки, позволяющие получить максимальные магнитные свойства в материалах и сплавах при предельном уровне анизотропных магнитных свойств. Так, для материалов и сплавов для магнитов основные этапы термомагнитной обработки для получения и стабилизации анизотропного состояния, следующие:

– сначала нагрев материала или сплава с соблюдением необходимых условий до определенной температуры, в частности, до температуры 750°С;

– далее охлаждение с соблюдением требуемых технологических параметров, в частности: с критической скоростью 0.15–0.25°С в минуту до конечной температуры 600°С в магнитном поле с напряженностью 1000 А/см.

Термомагнитная обработка по традиционной технологии требует продолжительного времени – около двух часов, при этом охлаждение проходит в сильном магнитном поле, возможном только в специальном электромагните или соленоиде. В размерах, соответствующих реальному ротору гистерезисного электромеханического преобразователя энергии, создание такого поля круговой конфигурации – трудноразрешимая задача, требующая значительного времени.

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРИСТИК В МАТЕРИАЛАХ И РОТОРАХ

В настоящей работе выполнены исследования хромокобальтовых сплавов, магнитные и гистерезисные свойства и характеристики которых располагаются в диапазоне средней магнитной жесткости и коэрцитивная сила рабочего гистерезисного цикла которых H_C размещается в диапазоне 30–300 А/см, с целью их улучшения. Указанные сплавы перспективны для конструкционной реализации роторов гистерезисных электродвигателей, требуемых для обеспечения работы механизмов и машин в режиме электрического синхронного вала. Для исследования были использованы теоретические и экспериментальные методы и средства. В качестве базовых параметров при исследовании хромокобальтовых сплавов были выбраны:

– относительная остаточная индукция цикла гистерезиса $b_r = B_r/B_m$, где B_r – абсолютное значение остаточной индукции, Тл, B_m – максимальное значение индукции магнитного поля цикла гистерезиса, Тл;

– относительная коэрцитивная сила цикла гистерезиса $h_C = H_C/H_m$, где H_C – абсолютное значение коэрцитивной силы, А/м, H_m – максимальное значение напряженности магнитного поля цикла гистерезиса, А/м;

– коэффициент выпуклости цикла гистерезиса $k_В = S_{цг}/(4B_mH_m)$, где $S_{ЦГ}$ – площадь цикла гистерезиса, Тл · А/м.

Параметры рассматривались в относительных единицах с целью облегчения проведения анализа и обобщения результатов исследования. В частности, исследовались следующие направления усовершенствования хромокобальтовых сплавов и роторов на их основе:

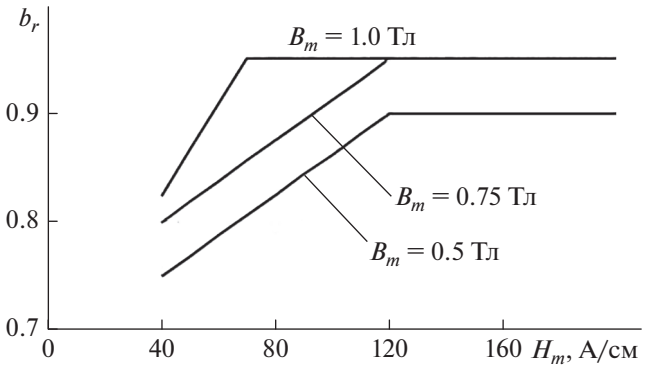

Рис. 1. Зависимость относительной остаточной индукции от напряженности магнитного поля, создаваемого при термомагнитной обработке.

– возможности снижения уровня напряженности магнитного поля, необходимого для создания магнитной текстуры при термомагнитной обработке образца материала или сплава или непосредственно ротора гистерезисного электродвигателя, выполненного из материала или сплава;

– возможности, наряду с уменьшением уровня напряженности указанного магнитного поля, повышения скорости охлаждения в магнитном поле образца – заготовки для ротора гистерезисного электродвигателя.

В работе получены зависимости, показывающие влияние напряженности магнитного поля, используемого в процессе термомагнитной обработки, $H_{m\text{ТМО}}$, А/м, на параметры и характеристики улучшенных сплавов хромокобальтового класса для роторов гистерезисных электродвигателей, перспективных для режима электрического синхронного вала:

$$b_r = B_r/B_m = b_r(H_{m\text{ТМО}}), \quad (1)$$

$$h_C = H_C/H_m = h_C(H_{m\text{ТМО}}), \quad (2)$$

$$k_B = S_{цг}/(4B_mH_m) = k_B(H_{m\text{ТМО}}). \quad (3)$$

На рис. 1 приведена зависимость (1), на рис. 2 – (2), на рис. 3 – (3).

Исследования при значениях индукции магнитного поля, располагающихся в области 1.0 Тл, актуальны для анализа, моделирования и расчетов электромагнитных и электромеханических процессов в гистерезисном электродвигателе в пусковом режиме, асинхронном режиме и в синхронном режиме без управления электродвигателем в составе электропривода. Исследования при уровнях индукции магнитного поля, соответствующих диапазону от значений менее 0.5 Тл до значений более 1.0 Тл, актуальны для анализа, моде-

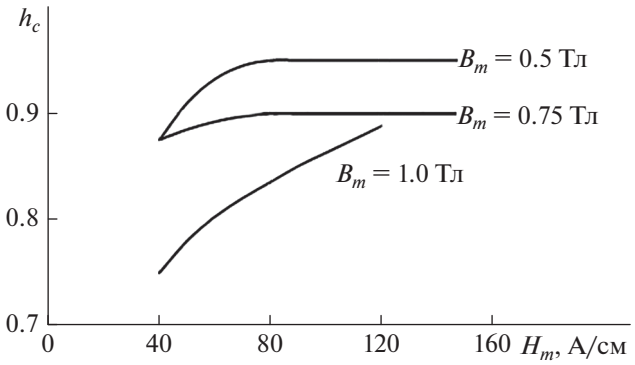

Рис. 2. Зависимость относительной коэрцитивной силы от напряженности магнитного поля, создаваемого при термомагнитной обработке.

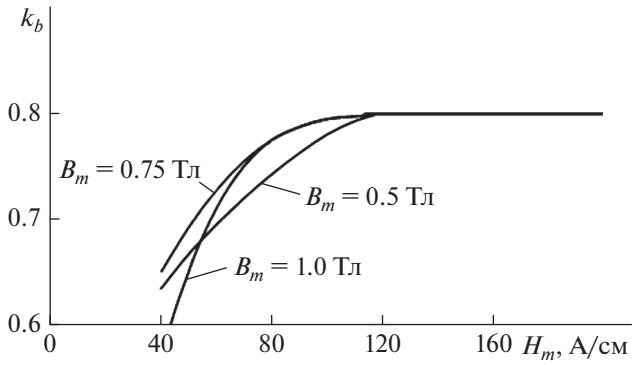

Рис. 3. Зависимость коэффициента выпуклости от напряженности магнитного поля, создаваемого при термомагнитной обработке.

лирования и расчетов электромагнитных и электромеханических процессов в гистерезисном электродвигателе в условиях возмущающих воздействий со стороны механической нагрузки на валу и управляющих воздействий со стороны электропитания при управлении электродвигателем.

Полученные зависимости показывают влияние напряженности магнитного поля, используемого в процессе термомагнитной обработки, на параметры циклов гистерезиса хромокобальтовых сплавов, перспективных для применения в роторах гистерезисных электромеханических преобразователей. Зависимости характеризуются монотонным возрастанием в основной части до достижения области насыщения, соответственно, последующее увеличение уровня напряженности магнитного поля при термомагнитной обработке не обеспечивает дальнейшего увеличения значений гистерезисных параметров.

Кроме этого, были выявлены и проанализированы дополнительные возможности улучшения гистерезисных свойств и характеристик, в частности, путем учета влияния скорости охлаждения материалов для роторов и непосредственно роторов гистерезисных электромеханических преобразователей энергии в магнитном поле на основные параметры цикла гистерезиса. Дополнительные возможности также связаны с исследованиями семейства гистерезисных характеристик в зависимости от напряженности магнитного поля при термомагнитной обработке, и длительности охлаждения. В частности, исследовано семейство гистерезисных кривых в зависимости от напряженности магнитного поля, используемого при термомагнитной обработке, и длительности охлаждения τ в интервале температур 750–600°C.

По результатам исследования получены научные рекомендации по выбору параметров технологического процесса при термомагнитной обработке хромокобальтовых сплавов и гистерезисных роторов на их основе. Параметры, определяемые в соответствии с рекомендациями, позволяют получить оптимальные и стабильные магнитные свойства и характеристики для различного сочетания требований, предъявляемым к свойствам и характеристикам материалов, сплавов и гистерезисных роторов на их основе.

Для диапазона изменения максимальной напряженности магнитного поля в материале и в активной части ротора 32–315 А/см при максимальной магнитной проницаемости материала получается коэффициент выпуклости в материале и в активной части ротора в рабочем состоянии в диапазоне 0.65–0.85 отн. ед. Это практически обеспечивает реализацию гистерезисных электродвигателей с моментами от долей единиц до сотен Н · м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, хромокобальтовые сплавы, обладающие магнитными и гистерезисными свойствами и характеристиками в диапазоне средней магнитной жесткости, обеспечивают эффективную реализацию роторов гистерезисных электромеханических преобразователей энергии. Возможно усовершенствование технологии изготовления роторов со значительным уменьшением напряженности магнитного поля, нужного для формирования магнитной текстуры при термомагнитной обработке материалов и роторов. Вместе с тем достижимо существенное увеличение скорости охлаждения заготовок для роторов гистерезисных преобразователей в магнитном поле.

Роторы гистерезисных электромеханических преобразователей энергии с высокими магнитными и гистерезисными свойствами и характеристиками можно реализовывать с применением термомагнитной обработки в магнитных полях с напряженностью 10–400 А/см при оптимальных базовых условиях охлаждения со скоростями 25–

350°С/мин, что было установлено расчетно-теоретическими исследованиями и подтверждено экспериментально.

Дополнительные возможности улучшения гистерезисных свойств и характеристик связаны с учетом влияния скорости охлаждения материалов для роторов и непосредственно роторов гистерезисных электромеханических преобразователей энергии в магнитном поле на основные параметры цикла гистерезиса. Также эти возможности связаны с исследованиями семейства гистерезисных характеристик в зависимости от напряженности магнитного поля при термомагнитной обработке, и длительности охлаждения.

Зависимости параметров цикла гистерезиса базовых хромокобальтовых сплавов от напряженности магнитного поля, создаваемого при термомагнитной обработке, характеризуются в основном монотонным возрастанием до достижения области насыщения, соответственно, последующее увеличение уровня напряженности магнитного поля при термомагнитной обработке не обеспечивает дальнейшего увеличения значений гистерезисных параметров.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 20-08-01045-а, № 20-08-01106-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Делекторский Б.А., Тарасов В.Н.* Управляемый гистерезисный привод. М.: Энергоатомиздат, 1983. 128 с.
2. *Тарасов В.Н., Останин С.Ю.* // Докл. IX Междунар. выст.-конгр. “Высокие технол., иннов., инвест.” (Санкт-Петербург, 2004). С. 127.
3. *Lee J.H., Kim J.C., Hyun D.S.* // Phys. B. Cond. Matter. 2000. V. 275. No. 1–3. P. 238.
4. *Makaveev D., Dupre L., De Wulf M., Melkebeek J.* // J. Magn. Magn. Mater. 2003. V. 254–255. P. 256.
5. *Qin R.* Permanent magnet hysteresis synchronous motor analysis and DSP-based vector control. PhD thesis. Newfoundland (Canada): Memorial University of Newfoundland, 2008. 150 p.
6. *Qian J.* Microprocessor implementation of field oriented control for permanent magnet hysteresis synchronous motor. PhD thesis. Newfoundland (Canada): Memorial University of Newfoundland, 2002. 150 p.
7. *Jung H.J., Nakamura T., Tanaka N. et al.* // Phys. C. Supercond. Appl. 2004. V. 405. No. 2. P. 117.
8. *Jagiela M., Bumby J., Spooner E.* // IET Electr. Power Appl. 2010. V. 4. No. 3. P. 185.
9. *Dlala E., Belahcen A., Arkkio A.* // J. Magn. Magn. Mater. 2008. V. 320. No. 20. P. 123.
10. *Golubev A.N., Subbotin M.V.* // Russ. Electron. Engin. 2002. V. 73. No. 1. P. 46.
11. *Альтман А.Б., Герберг А.Н., Гладышев П.А. и др.* Постоянные магниты: Справочник. М.: Энергия, 1980. 488 с.
12. *Белозеров Е.В., Уймин М.А., Ермаков А.Е. и др.* // Физ. мет. и металловед. 2008. Т. 106. № 5. С. 489.
13. *Артамонов Е.В., Либман М.А., Рудановский Н.Н.* // Сталь. 2007. № 6. С. 65.
14. *Либман М.А.* // Материаловедение. 2010. № 9. С. 58.
15. *Либман М.А.* // Материаловедение. 2010. № 10. С. 49.

Methods for obtaining optimal magnetic properties in the rotors of hysteretic electromechanical energy converters

I. M. Milyaev[a], S. Y. Ostanin[b, *], D. V. Mikheev[b], N. S. Zubarev[b], Cui Shumei[c], Zhu Chunbo[c]

[a] *Institute of Metallurgy and Material Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

[b] *National Research University “MPEI”, Moscow, 111250 Russia*

[c] *Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001 China*

**e-mail: OstaninSY@mpei.ru*

We studied the formation of optimal hysteresis properties and characteristics in materials for rotors of hysteretic electromechanical energy converters and directly in the rotors. The influence of the intensity of the magnetic field, created during the thermo-magnetic treatment of materials and rotors, on the parameters of the hysteresis cycle of the base chromium–cobalt alloys is investigated.