

Термическая обработка Fe-Co-V как инструмент совершенствования качества изделий из магнитомягких материалов

А.В. Чижов

Несмотря на то, что магнитомягкие сплавы на основе тройной системы Fe-Co-V, одним из представителей которых является сплав 49К2ФА (ГОСТ 10160–75), были разработаны в середине прошлого века, они и по настоящее время находят широкое применение в производстве роторов и статоров различных электрических машин из-за высокой магнитной индукции технического насыщения B_s – до 2,4 Тл, высокой температуры Кюри, повышенной магнитной проницаемости в слабых и средних магнитных полях, малых удельных потерь на перемагничивание $P_{в/ф}$ при высоких значениях индукции на частоте до 400 Гц [1, 2]. К таким машинам относятся электрические моментные двигатели [3], которые в последние годы нашли широкое применение в качестве исполнительных элементов в современных системах автоматики, телемеханики, а так же в узлах техники специального назначения.

Требование высоких эксплуатационных характеристик моментных двигателей обуславливает применение новых и совершенствование комплекса технологических свойств применяемых магнитных сплавов. При производстве деталей из магнитомягких сплавов основной технологической операцией, определяющей магнитные свойства, является термическая обработка. За счет нее снижаются напряжения в кристаллической решетке, восстанавливаются размеры зерен и устраняется наклеп в поверхностных слоях материала, связанный с предшествующими механическими операциями: штамповкой, лазерной резкой и шлифовкой заусенцев. Применение отжига позволяет не только восстановить магнитные характеристики магнитомягкого сплава вследствие уменьшения плотностей дислокаций и изменения структуры дефектов кристаллической решетки

сплава, выравнивания химического состава, гомогенизации и атомного упорядочивания, но и улучшить их [4].

Известно, что режимы отжига существенно зависят от степени ухудшения магнитных свойств сплава. Меньшее содержание вредных примесей металлургического происхождения и примесей, растворенных в решетке матрицы, и более совершенная кристаллическая решетка, позволяют достичь наивысших магнитных свойств. Вследствие этого применение режимов отжига, рекомендованных в (ГОСТ 10160–75) и сертификатах на поставляемый сплав, может привести к неудовлетворительным результатам, поскольку не обеспечивает требуемых магнитных свойств.

Согласно (ГОСТ 8.377–80) влияние режимов термической обработки на магнитные свойства сплава необходимо оценивать проведением измерений параметров тороидальных образцов-свидетелей. Для этого из ленты 49К2ФА методом листовой штамповки изготовлено 8 кольцевых образцов диаметрами 39мм наружный и 35мм внутренний, массой 38–40 г. каждый, что позволяет свести к минимуму влияния на результаты измерений формы образцов. Далее образцы подвергаются термообработке в вакууме, что способствует защите поверхности образцов от окисления и достигается дегазация сплава. Это в совокупности приводит к улучшению магнитных свойств.

Измерения магнитных свойств осуществлялось на тороидальных образцах-свидетелях с помощью «Измерителя параметров магнитомягких материалов ММ-50А» [5].

Для выявления оптимального режима термообработки проведен анализ диаграммы состояния двойной системы Fe–Co [6]. В связи с этим рассмотрены следующие этапы отжига, которые характеризуются параметрами, обуславливающими качество термообработки:

1. подготовка к термообработке;
2. определение максимальной температуры отжига и скорости ее достижения;

3. определение времени выдержки при максимальной температуре;
4. определение режима и скорости снижения температуры.

В процессе подготовки основное внимание необходимо уделять предотвращению спекания кольцевых образцов между собой и с оправкой. Для этого применим неактивные покрытия [7], к которым относятся оксиды магния, алюминия и кальция. Данные материалы способствуют удалению газообразных продуктов рафинирования с поверхности сплава. Это в свою очередь улучшает магнитные свойства.

Анализ скорости нарастания температуры показывает, что она не оказывает существенного влияния на качество отжига [8], тем не менее, малая скорость нагрева нежелательна по экономическим соображениям, поскольку приводит к потере времени на термообработку и дополнительным затратам. В то же время высокая скорость нагрева вызовет появление трещин на поверхности сплава. В работе во всех случаях скорость нагрева составляла $500^{\circ}/\text{ч}$.

Исходя из диаграммы состояния Fe – Co максимальная температура отжига может быть установлена в интервале $850 - 900^{\circ}\text{C}$ (образец S1) и в интервале $1050 - 1100^{\circ}\text{C}$ (образец S2). Это связано с тем, что процессы металлургического характера наиболее активно протекают под действием высоких температур [9].

Значащим фактором является время выдержки при максимальной температуре, поскольку процесс образования равновесных структур, увеличения показателя дегазации металла носят относительно длительный характер [10]. В связи с этим термообработке подвергнуты образцы S3, S4, S5, время выдержки при максимальной температуре которых, составляло 3, 4, 6 часов соответственно.

Существенным является градиент снижения температуры. Малая скорость охлаждения оказывает положительное влияние на магнитные свойства Fe – Co–V сплавов (образец S6, S7, S8), что свидетельствует о том, что оптимальной является упорядоченная равновесная структура [11].

Поскольку нагрев осуществлялся до температуры 850°C (образцы S6, S7, S8), то режим охлаждения выбран одноступенчатым с постоянной скоростью.

Результаты исследования режимов термообработки на изменение магнитных свойств, приведены в таблице №1.

Таблица № 1

Результаты исследования

№ п/п	B_r , Тл	μ_{\max} , Гс/Э	$B_{\mu\max}$, Тл	$H_{\mu\max}$, А/м	B_s , Тл	H_c , А/м	BH_{\max} , Дж/м ³	$H_{BH\max}$, А/м
S1	1,528	12567	1,231	77,96	2,256	61,53	54,78	-46,18
S2	1,174	11066	0,744	55,67	2,038	47,92	32,11	-55,67
S3	1,272	12695	0,904	56,66	2,157	45,299	31,46	-29,9
S4	1,242	1313	0,859	51,99	2,188	42,978	31,38	-31,34
S5	1,371	12837	1,018	63,08	2,249	49,248	38,89	-16,22
S6	1,38	12323	1,019	65,8	2,263	53,453	42,93	-40,27
S7	1,349	13967	0,93	53,01	2,227	45,606	41,43	-35,26
S8	1,355	19325	0,877	36,11	2,236	32,786	31,16	-36,11
S9	1.179	2905.9	1.069	292.7	2.114	192.92	91.12	-120.1
S10	1.462	4753.5	1.268	212.3	2.201	148.44	91.1	-95.3

Анализ диаграммы состояния и результатов измерений (таблица №1) показывает, что длительное действие температуры свыше 1000°C приводит к неудовлетворительному результату (образец S2). Это может быть связано с неконтролируемым ростом зерен при таких температурах и с изменением типа кристаллической решетки при охлаждении, что требует дополнительного времени выдержки для снятия напряжений, возникающих в процессе фазового перехода. Наилучшие магнитные свойства получились

при отжиге с максимальной температурой, не превышающей 900°C (образец S1).

При малом времени выдержки процессы рекристаллизации и роста зерна протекают не полностью (образец S3). С увеличением времени выдержки наблюдается рост магнитной индукции (образец S4), наибольшее значение которой достигается после выдержки в течение 6ч (образец S5). Дальнейшее увеличение времени выдержки является не целесообразным.

Снижение коэрцитивной силы от $(60 \div 50)$ А/м до $(28 \div 32)$ А/м наблюдается при уменьшении скорости охлаждения при одноступенчатом режиме.

Выводы:

1. Выявлена зависимость между режимами термообработки и магнитными свойствами сплава 49К2ФА толщиной 0,1 – 0,2мм, что позволило оптимизировать этапы термообработки.
2. Установлено, что с увеличением времени выдержки при максимальной температуре повышается значения магнитной индукции в диапазоне поля намагничивания от 0 до технического насыщения. Оптимальные значения индукции достигаются после 6 часов выдержки.
3. Показано, что скорость охлаждения 100°/ч оказывает положительное влияние на магнитные свойства Fe–Co–V сплавов: оптимальной является упорядоченная равновесная структура.
4. Предложенный режим термообработки позволил улучшить показатели магнитных свойств ленты 49К2ФА I и II классов. Исследование времени выдержки и режима охлаждения обусловило снижение коэрцитивной силы Fe–Co сплава 49КФ (образцы S9, S10).

Литература:

1. Стародубцев Ю.Н. Мир материалов и технологий. Магнитомягкие материалы. [Текст] – М.: «Техносфера». –2011. –664с.
2. Cullity B.D., Graham C.D., Introduction to magnetic materials. Second Edition. IEEE Press. –2009. –545p.
3. Осьмаков А. А. Технология и оборудование производства электрических машин [Текст]. Учебник для техникумов. – М.: «Высш. школа». –1971. – 344с.
4. Мишин Д.Д. Магнитные материалы [Текст]: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп.– М.: «Высшая школа». –1991. – 384с.
5. Вареник Ю.А., Метальников А.М., Рябов Д.В., Чижов А.В. Автоматизированная установка для исследования магнитомягких материалов [Текст] // Университетское образование: сб. статей XVI Международной науч.-метод. конференции. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та. –2012.– С.176–177.
6. Диаграммы состояния двойных металлических систем [Текст]: Справочник: В 3 т.: Т.2 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение. –1997. – 1024с., ил.
7. Кекало И.Б., Самарин Б.А. Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами [Текст]: Учебник для вузов. – М.: Metallurgy. –1989. –496с.
8. Преображенский А.А., Бишард Е.Г. Магнитные материалы и элементы: Учебник для студ. вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики». – 3-е изд., перераб. и доп. [Текст] – М.: Высш. шк. – 1986. –352с.: ил.
9. Totten G.E. (Ed.) Steel Heat Treatment: Metallurgy And Technologies. Taylor & Francis Group, 2 edition. –2006. –820p.

10. Бойко Н. И., Фисенко К. С. Исследование качества поверхности наплавленного металла цилиндрической детали обработанной в горячем состоянии [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/746> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
11. Лившиц А. В. Влияние термоизоляторов на нагрев полимеров при высокочастотной электротермии [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2014, №2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2348> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.