

Температурный магнитный гистерезис и температурная стабильность магнитных свойств

Содержание

1. Температурный магнитный гистерезис
2. Магнитное старение
3. Термомагнитные коэффициенты

Использованная литература

Приложение 1

Приложение 2

1. Температурный магнитный гистерезис магнитный температурный коэффициент

Температурный магнитный гистерезис (термомагнитный гистерезис) - неоднозначная зависимость намагниченности (индукции) ферромагнетика, находящегося в постоянном внешнем магнитном поле B в некоторых случаях термоциклирование может происходить при отсутствии внешнего магнитного поля. $I_H(T)$, при термоциклировании в области температур ниже точки Кюри*** Процесс, состоящий из нескольких последовательных нагреваний и охлаждений исследуемого объекта в неизменном интервале температур $T_1 T_2 T_1 \dots$ получил название термоциклирования. Процесс термоциклирования может быть как прямой (-100 +100 -100C) так и обратный (+100 -100 +100C).* [1]. Величина его намагниченности в слабых постоянных магнитных полях может существенно зависеть от типа ферромагнитного материала, температурной предыстории объекта исследования и от момента включения магнитного поля на температурной кривой.

Наблюдается два вида термомагнитного гистерезиса. В первом случае изменение магнитного параметра происходят вследствие перестройки доменной структуры, во втором - на изменение магнитного параметра влияет перестройка кристаллической структуры гетерогенного ферромагнитного материала [2]. В первом случае происходит так называемое магнитное старение, во втором - структурное старение.

Величина обратимых и необратимых изменений магнитного состояния ферромагнетиков существенно зависит с одной стороны, от свойств магнитного материала (величины коэрцитивной силы H_c и температуры Кюри T_c), их зависимости от температуры и формы кривой размагничивания, с другой стороны, от формы объекта исследования, то есть от положения рабочей точки образца конечной формы или магнитной системы в целом. Поэтому говоря о параметрах температурной стабильности, необходимо всегда указывать либо форму образца, либо величину собственного поля размагничивания (размагничивающего фактора), либо координаты рабочей точки исследуемого ферромагнитного образца [4, 5].

2. Магнитное старение

В зависимости от типа магнитного материала (магнитомягкий или магнитотвердый) и того находится объект исследования в постоянном подмагничивающем поле или нет, вид термомагнитной кривой будет иметь свои особенности:

1. Постоянное магнитное поле имеет конечную величину $H_i < H_S$ (H_i - магнитное поле, в котором проводится термоциклирование; H_S - магнитное поле, в котором исследуемый объект намагничивается до насыщения), объект исследования относится к группе магнитомягких, т.е. в отсутствии подмагничивающего поля намагниченность его близка к нулевой.

Рис. 10. Термомагнитные кривые для образцов кремнистого железа (4% кремния) при термоциклировании $_{195} 260$ $_{195}C$ (цикл А) [3]

На рис. 10 и 11 приведены термомагнитные кривые для образцов кремнистого железа ($\sim 4\% Si$), измеренные в интервале температур от $_{195}$ до $+260C$ при изменении магнитного поля от 0,006 до 9,00 Э. Термоциклирование проводилось двумя способами: цикл А - образец охлаждается при отсутствии магнитного поля до наименьшей T_{min} температуры данного цикла, затем включается постоянное магнитное поле и образец медленно нагревается до максимальной температуры T_{max} - восходящая ветвь - и вновь охлаждается до T_{min} - нисходящая ветвь; при цикле Б - магнитное поле включается при T_{max} , затем образец охлаждается до T_{min} (нисходящая ветвь), после чего производится нагрев до T_{max} (восходящая ветвь).

Рис. 11. Термомагнитные кривые для образцов кремнистого железа (4% кремния) при термоциклировании 260 $_{195} 260C$ (цикл Б) [3]

Из рис. 10 видно, что в слабых магнитных полях (0,006 - 0,03 Э) намагниченность при увеличении температуры растет и проходит через максимум при температуре порядка 200С. При понижении температуры нисходящие ветви идут ниже восходящих вплоть до температуры порядка 100С, потом пересекают их, образуя замкнутую петлю, и идут выше, показывая слабый рост намагниченности [3].

При увеличении магнитного поля рис. 10 (от 0,18 до 0,90 Э) максимумы на восходящих ветвях и замкнутая петля исчезают, а величина намагниченности монотонно возрастает в течение всего цикла. Дальнейшее увеличение магнитного поля (до 3,00 Э) изменяет ход термомагнитной кривой - намагниченность на восходящей кривой снижается, а на нисходящей ветви продолжает возрастать. Это возрастание делается все менее заметным и при полях $\sim 9,00$ Э температурный магнитный гистерезис исчезает практически полностью, а зависимость $I(T)$ становится обратимой.

Все кривые для циклов Б (рис. 11), независимо от величины внешнего подмагничивающего поля, имеют один и тот же характер. На всех нисходящих ветвях (охлаждение) намагниченность всегда монотонно возрастает, а на восходящих ветвях (нагрев) - намагниченность только убывает. По мере роста величины подмагничивающего поля уменьшается как относительное различие между ветвями, так и сам относительный рост намагниченности. В полях ~ 9 Э термомагнитный гистерезис также исчезает полностью.

Рис. 12. Кривая намагничивания (--) , нисходящая (--) и восходящая (--) части петли гистерезиса для образца кремнистого железа (4% Si)

На рис. 12 приведены кривая намагничивания и полупетля гистерезиса для образцов кремнистого железа (4% Si), измеренные при температуре -195С [3]. Если привязать термомагнитные кривые (рис. 10 и 11) к участкам кривой намагничивания соответствующим полям 0.006, 0.03, 0.18, 0.9, 3 и 9 Э, можно увидеть, что как сам гистерезис, так и процесс намагничивания заканчивается в полях до 8 - 9 Э. Ясно, что температурный магнитный гистерезис обусловлен в основном процессами необратимых смещений доменных границ при намагничивании ферромагнитного образца и наиболее ярко проявляется в магнитных полях до 1,0-1,5 Э (до участка насыщения). Это подтверждается зависимостями % от величины подмагничивающего поля H_i (рис. 13). Значения и - величины намагниченности для начальной и конечной точки гистерезисного цикла соответственно. Хорошо видно, что термомагнитный гистерезис стремится к нулю в полях порядка 1,0 Э и исчезает полностью в полях 1,5 Э. В этих же полях в основном заканчивается изменение магнитного состояния исследуемого образца, вызванное процессами необратимого смещения доменных границ.

Рис. 13. Зависимость изменения намагниченности от подмагничивающего поля при термоциклировании [3]

Повторное многократное термоциклирование приводит к постепенному уменьшению гистерезиса и переходу к однозначной устойчивой зависимости $I(T)$.

2. Объект исследования относится к группе ферромагнитных материалов, сохраняющих намагниченное состояние в отсутствие подмагничивающего поля. На рис. 14 показаны изменения вида термомагнитных кривых для остаточной намагниченности образца кремнистого железа (4% Si) при многократном изменении температуры -200 0 -200С** При измерении магнитных свойств в присутствии собственного поля размагничивания объекта исследования правильнее говорить не об остаточной намагниченности I_r (рис. 14), а о величине намагниченности в рабочей точке объекта исследования I_d . Максимальное уменьшение I_d происходит после первого температурного цикла (~70%). Второй и третий температурные циклы приводят к меньшим изменениям I_d , при дальнейшем термоциклировании изменения остаточной намагниченности происходят обратимо. Вид термомагнитной кривой отличается от показанного на рис. 10, так как исследуемый объект в отличие от случая 1 сохраняет намагниченное состояние в отсутствие намагничивающего поля.

Рис. 14. Термомагнитные кривые при многократном термоциклировании [3]

В основе температурного магнитного гистерезиса лежат, как правило, две причины - «статическая» и «динамическая»:

- первая «статическая» связана с тем, что при изменении температуры ферромагнетика, условия равновесия его магнитной (доменной) структуры могут нарушаться под влиянием: 1) изменения спонтанной намагниченности ; 2) изменения величины констант магнитокристаллической анизотропии и магнитострикции , а также величины и степени дисперсности внутренних напряжений , скорости диффузии и т.п.

- вторая «динамическая» определяется изменением соотношения величин

магнитной энергии и других типов энергий кристалла (F_k - магнитной анизотропии, $F_{m.c.}$ - магнитостатической, F - магнетопругой) в процессе изменения температуры при термоциклировании.

3. Термомагнитные коэффициенты

Количественно термомагнитный гистерезис (магнитное старение) можно оценить при помощи коэффициента необратимых изменений магнитного параметра .

Пусть в процессе шестикратного термоциклирования (рис. 12) изменение намагниченности I_d приобретает обратимый характер. Обозначим значение намагниченности в точке 1 - , а в точке 7 - , тогда

, (1) .

Знак «+» означает, что $I_d >$, то есть в процессе термоциклирования происходит увеличение значения намагниченности, знак «-» означает уменьшение значения намагниченности в процессе термоциклирования, то есть $I_d <$.

Пусть температурный цикл ограничен температурами T_1 (начальной) и T_2 (конечной), причем $T_1 < T_2$. Начальное значение магнитного параметра**
Магнитный параметр может быть представлен, например, в качестве остаточной индукции B_r (при отсутствии собственного поля размагничивания исследуемого объекта и перемагничивающего поля), индукции в рабочей точке B_d (при наличии собственного поля размагничивания объекта исследования или системы электромагнит-образец в целом и отсутствии перемагничивающего поля), а также при необходимости в виде B - индукции объекта исследования в перемагничивающем поле (или в поле, являющемся суммой перемагничивающего и размагничивающего полей). при температуре T_1 обозначим M_0 . Значение магнитного параметра при температуре T_2 обозначим M_2 . Значение магнитного параметра после завершения температурного цикла при температуре T_1 обозначим . Тогда выражение (1) примет окончательный вид
(2) .

Коэффициент необратимых изменений магнитного параметра показывает на сколько процентов изменится (увеличится или уменьшится) величина магнитного параметра после термоциклирования в выбранном диапазоне температур. После многократного термоциклирования (3 - 5 циклов) изменение остаточной намагниченности I_d происходят обратимо по кривой 6 - 7 (рис. 12). Так как зависимость $M(T)$ в общем случае имеет нелинейный характер количественно обратимые изменения магнитного параметра описываются с помощью дифференциального коэффициента обратимых изменений d

В небольших интервалах температур на практике принято пренебрегать нелинейностью зависимости $M(T)$ и пользоваться коэффициентом T , определенным по значениям параметра M для начала и конца интервала термоциклирования $T = T_2 - T_1$. Значение магнитного параметра M_2 при температуре T_2 находят как

откуда

.(3) /

Коэффициент обратимых изменений магнитного параметра T показывает, насколько изменится величина магнитного параметра при нагревании или охлаждении ферромагнитного объекта исследования в выбранном интервале температур на один градус Цельсия (Кельвина). Знак «+» означает, что $>$, то есть значение магнитного параметра в процессе увеличения температуры увеличивается, знак «-» означает уменьшение значения магнитного параметра в процессе термоциклирования, то есть $<$.

Использованная литература

1. Физический энциклопедический словарь.- М.: Советская энциклопедия. 1960, Т. 1, С. 470.
2. Физический энциклопедический словарь.- М.: Советская энциклопедия. 1966, Т. 5, С. 137.
3. Вонсовский С.В., Шур Я.С. Ферромагнетизм. - Москва: ОГИЗ Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. - с. 425-433.
4. Постоянные магниты. Справочник / Альтман А.Б., Герберг А.Н., Гладышев П.А. и др.; Под ред. Ю.М. Пятина. - М.: Энергия, 1980. - 488 с.
5. Миткевич А.В. Стабильность постоянных магнитов. - Л.: 1971. - 228 с.

Приложение 1

Основные обозначения и соотношения

Термоциклирование - циклическое изменение температуры от начальной до конечной и снова до начальной;

$T = T_2 - T_1$ - температурный интервал или интервал термоциклирования;

T_1 - начальная температура интервала термоциклирования;

T_2 - конечная температура интервала термоциклирования;

M - магнитный параметр (B - индукция, I - намагниченность, μ - удельная намагниченность);

M_0 - исходное значение магнитного параметра;

M_2 - значение магнитного параметра при максимальной температуре интервала термоциклирования;

- значение магнитного параметра при начальной температуре интервала термоциклирования после термостабилизации при температуре T_2 ;

- коэффициент необратимых изменений магнитного параметра для заданного интервала температур;

** В некоторых случаях в качестве единицы измерения коэффициента может применяться $\%K^{-1}$. - коэффициент обратимых изменений магнитного параметра для заданного интервала температур.

Приложение 2

Вопросы и задачи

1. Гистерезис (определение физического явления, виды гистерезиса, примеры).
2. Терромагнитный гистерезис (определение, виды, внешние проявления, примеры).
3. Термоциклирование (определение понятия, описать алгоритм изменения температуры, привести пример).

4. Климатический интервал температур (дать определение, привести пример). Как находятся его границы, для каких целей используются измерения изменения магнитных свойств постоянных магнитов в климатическом интервале температур?
 5. Старение (определение, виды, внешние проявления, примеры).
 6. Магнитное старение (дать определение и описать процессы, происходящие в ферромагнетиках). Обратимые и необратимые изменения магнитных свойств постоянных магнитов (привести пример).
 7. Температурный коэффициент необратимых изменений магнитных свойств (определение, единицы измерения, знак).
 8. Необратимые изменения магнитных свойств. Магнитное старение. Коэффициент необратимых изменений магнитных свойств. Определение. Форма выражения. Единицы измерения.
 9. В чем сходство и различие процессов структурного и магнитного старения постоянных магнитов (привести примеры и сравнительный анализ рассматриваемых процессов, указать способы восстановления уровня магнитных свойств до первоначального значения)?
 10. Временная стабильность магнитных свойств постоянных магнитов (дать определение, описать процессы, происходящие в ферромагнетике, привести пример, указать единицу измерения).
 11. Структурная и магнитная стабильность магнитных свойств, сходство и различие.
 12. Обратимые изменения магнитных свойств ферромагнитных образцов (определение, способ определения, привести пример).
 13. Температурный коэффициент обратимых изменений магнитных свойств постоянных магнитов, какие свойства ферромагнитного материала он может характеризовать (определение, единицы измерения, знак, привести пример).
 14. Какие свойства постоянных магнитов могут характеризоваться температурными коэффициентами обратимых и необратимых изменений магнитных свойств?
 15. Старение постоянных магнитов. Для каких процессов, происходящих в ферромагнитных материалах, применяется это понятие (дать определение и привести примеры).
 16. Какие процессы характеризуют коэффициенты обратимых и необратимых изменений магнитных свойств постоянных магнитов. Что определяет их величину и знак?
 17. Магнитная стабильность, причины необратимых изменений магнитных свойств. Определение.
 18. Параметры температурной стабильности магнитных свойств. Предельный (климатический) интервал температур. Определения.
 19. Определить коэффициент обратимых изменений индукции 100 если $B_0 = 11$ кГс, $B_{100} = 9,8$ кГс, а коэффициент необратимых изменений индукции 100 = -10%.
- Решение: Для вычисления 100 необходимо сначала найти значение . По определению

,

а .

Отсюда

$I = 9,9$ кГс

Далее определяем значение I_{100}

$I_{100} = 10,8$ кГс

20. Определить коэффициент обратимых изменений индукции I_{100} если $I_0 = 11$ кГс, $I_{100} = 10,8$ кГс, а коэффициент необратимых изменений индукции $I_{100} = 10\%$.

21. Определить коэффициент обратимых изменений индукции I_{100} если $I_0 = 11$ кГс, $I_{100} = 9,8$ кГс, а коэффициент необратимых изменений индукции $I_{100} = -12\%$.

22. Определить коэффициент необратимых изменений индукции I_{150} постоянного магнита с $I_0 = 10,5$ кГс если после термостабилизации при 150°C его индукция уменьшилась до $I_{150} = 9,2$ кГс.

23. Определить коэффициент необратимых изменений индукции I_{150} постоянного магнита с $I_0 = 12$ кГс если после термостабилизации при 100°C его индукция увеличилась до $I_{150} = 12,8$ кГс.

24. Определить коэффициент необратимых изменений индукции I_{100} постоянного магнита с $I_0 = 12$ кГс если $I_{100} = 10,5$ кГс, а $I_{100} = +0,015\% \text{C}^{-1}$.

25. Определить величину намагниченности постоянного магнита в исходном состоянии I_0 если $I_{150} = 9,5$ кГс, $I_{150} = +0,012\% \text{C}^{-1}$, $I_{150} = 10\%$.

26. Определить величину намагниченности постоянного магнита в исходном состоянии I_0 если $I_{150} = 9,5$ кГс, $I_{150} = +0,012\% \text{C}^{-1}$, $I_{150} = 10\%$.

27. Определить индукцию образца при 100°C I_{100} если $I_0 = 12$ кГс, $I_{100} = -0,025\% \text{C}^{-1}$, а $I_{100} = -12\%$.

28. Определить индукцию образца при 100°C I_{100} если $I_0 = 12$ кГс, $I_{100} = +0,025\% \text{C}^{-1}$, а $I_{100} = +1,0\%$.

29. Определить величину намагниченности постоянного магнита при 100°C I_{100} если $I_0 = 12$ кГс, $I_{200} = +0,012\% \text{C}^{-1}$, $I_{100-200} = -0,02\% \text{C}^{-1}$, а $I_{200} = -10\%$.

Решение: Из выражения для I_{200} найдем величину как

, или

$I_{200} = 120,9 = 10,8$ кГс.

Из выражения для I_{200} найдем значение как

, или

откуда

$I_{200} = 11,06 = 11,1$ кГс.

Из выражения найдем значение как

, или

откуда

$I_{200} = 11,327 = 11,3$ кГс.

30. Определить величину намагниченности постоянного магнита при 100°C I_{100} если $I_0 = 12$ кГс, $I_{200} = -0,025\% \text{C}^{-1}$, $I_{100-200} = +0,02\% \text{C}^{-1}$, а $I_{200} = -10\%$.

31. Определить величину намагниченности постоянного магнита при 100°C I_0 если $I_{100} = 11$ кГс, $I_{200} = +0,015\% \text{C}^{-1}$, $I_{100-200} = +0,02\% \text{C}^{-1}$, а $I_{200} = -10\%$