



УДК 620.179.14

Поступила 05.09.2014

С. Г. САНДОМИРСКИЙ, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

ИЗМЕНЕНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ МАГНИТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ЧУГУНА ПО СРАВНЕНИЮ СО СТАЛЬЮ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВНУТРЕННЕГО РАЗМАГНИЧИВАНИЯ

Во всем диапазоне изменения магнитных свойств чугунов установлена связь их максимальной магнитной проницаемости μ_m с коэрцитивной силой H_c и остаточной намагниченностью M_r . Выявлены отличия этой связи для сталей и чугунов. Формула для расчета μ_m сталей по H_c и M_r скорректирована для расчета μ_m чугунов. В результате корректировки погрешность расчета μ_m чугунов снижена. Результаты могут быть использованы в магнитном структурном анализе взамен трудоемкого измерения μ_m .

Connection of maximum magnetic permeability μ_m of cast irons with coercive force H_c and residual magnetism M_r is established in all size of changing of the magnetic characteristics of cast iron. Differences of this connection for steels and cast irons are revealed. Formula for calculation μ_m of steels by H_c and M_r is corrected for calculation μ_m of cast irons. As a result of correction the calculation error of cast irons μ_m is diminished. The results can be used in magnetic structural analysis instead of labor-consuming measurement μ_m .

Основными параметрами магнитного структурного анализа материалов являются коэрцитивная сила H_c , остаточная намагниченность M_r и максимальная магнитная проницаемость μ_m . Чувствительность μ_m к структурным превращениям в металлах отлична от чувствительностей к ним H_c и M_r . Но измерение μ_m более трудоемко и менее точно, чем измерение H_c и M_r . Данные о влиянии технологий получения материалов на их μ_m приводятся в литературе реже, чем на H_c и M_r . Это определяет важность поиска связи μ_m материалов с их H_c и M_r .

Такая связь установлена в [1] Гумлихом и Шмидтом для «сталей и чугунов». В системе СИ разработанная ими эмпирическая формула имеет вид

$$\mu_m \approx (0,476 + 0,0000712\gamma H_c) M_r / H_c, \quad (1)$$

где $\gamma = 1$ м/А.

Зависимость (1) используют в научной и учебной литературе как достоверный факт. Но узкий диапазон изменения магнитных свойств стальных и чугунных образцов в [1] не позволил выявить отличия в связи μ_m с H_c и M_r для сталей и чугунов и обеспечить необходимую точность расчета μ_m .

В [2] статистическим анализом взаимосвязи магнитных параметров 855 сталей с $0,5 \text{ кА/м} < H_c < 8 \text{ кА/м}$, прошедших закалку и отпуск по разным режимам, разработана формула для расчета μ_m сталей по H_c и M_r :

$$\mu_m \approx [0,5 + 0,00006\gamma H_c - (0,000068\gamma H_c)^2] M_r / H_c. \quad (2)$$

Показано, что среднее значение $\bar{\delta}$ модуля относительной погрешности расчета μ_m сталей по (2) в 1,58 раза меньше, чем $\bar{\delta}$ расчета μ_m сталей по формуле (1), и составляет менее 10%. Это меньше суммы погрешностей δ измерения по стандартным методикам, входящих в формулу (2) параметров.

Еще лучшие результаты получены в [3] для расчета μ_m сталей с $4 \text{ кА/м} \leq H_c < 8 \text{ кА/м}$:

$$\mu_m \approx [0,5 + 0,000053\gamma H_c - (0,00006\gamma H_c)^2] M_r / H_c. \quad (3)$$

Формула (3) обеспечивает $\bar{\delta}$ расчета μ_m вдвое меньшую, чем δ измерения μ_m по стандартной методике, на порядок меньшую, чем $\bar{\delta}$ расчета μ_m этих сталей по (1).

Но намагничивание чугунов происходит при размагничивающем влиянии графитовых включений. Это отличие от намагничивания сталей не позволяет применить разработанные формулы (2) и (3) для расчета μ_m чугунов по их H_c и M_r .

Цель данной работы – получение связи максимальной магнитной проницаемости чугунов с параметрами предельной петли их магнитного гистерезиса во всем диапазоне изменения магнитных свойств чугунов.

**Методика и результаты
статистического анализа**

Для анализа используем результаты измерения μ_m , H_c и M_r чугунов на одних и тех же образцах по методикам [4]. Этому удовлетворяют результаты измерения μ_m , B_r и H_c чугунов с пластинчатой и сферической формой графитовых включений, прошедших разную термическую обработку [5, табл. 4, 5], [6, табл. 7]. Измерения магнитных свойств чугунов в [5, 6] соответствуют требованиям [4], а 11 термических обработок, проведенных в [5, 6], не изменяя формы графитовых включений в образцах, обеспечили широкий диапазон изменения их магнитных свойств. При анализе учтены и результаты измерения в [1] магнитных свойств серого чугуна, использованные при разработке формулы (1).

Проходящие через начало координат линейные уравнения регрессии вида

$$\mu_m(\text{эксперимент}) = k\mu_m(\text{расчет}) \quad (4)$$

(k – коэффициент) между результатами расчета μ_m по разным формулам и результатами измерения μ_m построены в программе «Microsoft Excel». Для анализа использованы коэффициент R корреляции уравнения регрессии (4), рассчитанный программой по стандартной формуле, а также среднее значение $\bar{\delta}$ модуля относительной погрешности δ измерения μ_m :

$$\bar{\delta} = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\mu_m(\text{расчет})_i - \mu_m(\text{эксперимент})_i|}{\mu_m(\text{эксперимент})_i} \quad (5)$$

При сопоставительном анализе результатов расчета μ_m по разным формулам в качестве критерия использована и близость коэффициента k в (4) к 1.

Связь между H_c , M_r и μ_m чугунов будем искать в виде:

$$\mu_m \approx \xi[0,5 + 0,00006\gamma H_c - (0,000068\gamma H_c)^2] M_r / H_c \quad (2')$$

и

$$\mu_m \approx \xi[0,5 + 0,000053\gamma H_c - (0,00006\gamma H_c)^2] M_r / H_c, \quad (3')$$

где ξ – коэффициент, полученный на основе сравнения результатов расчета μ_m чугунов по (2') и (3') с достоверными результатами измерения μ_m тех же чугунов.

Результаты анализа связи μ_m чугунов с их M_r и H_c при расчете μ_m по формулам (1), (2), (3), (2') и (3') для исследованных чугунов приведены в таблице.

Анализ показал, что используемая в научной литературе формула (1) при расчете μ_m чугунов с $0,3 \text{ кА/м} \leq H_c \leq 6,0 \text{ кА/м}$ при высоком $R \approx 0,985$ между результатами расчета и эксперимента приводит к результатам, заниженным в среднем на 9%. При этом $\bar{\delta}$ расчета составляет 8,8%. Разработанная в [2] для расчета μ_m сталей формула (2) при расчете μ_m чугунов снижает $\bar{\delta}$ расчета до 7,7%. При этом коэффициент k в уравнении регрессии (4) между результатами расчета измерения μ_m равен 1,08. Значит, расчет μ_m чугунов по формуле (2) приводит к значениям μ_m , заниженным по сравнению с экспериментом в среднем на 8%. Это является следствием того, что под размагничивающим действием графитовых включений при прочих равных условиях M_r чугуна снижается в 1,08 раза быстрее, чем его μ_m . Подтверждением этому является и близкое к 1,08 значение $k \approx 1,089$, полученное в уравнении регрессии (4) между результатами расчета μ_m по формуле (3) и измерения μ_m магнитотвердых чугунов ($4 \text{ кА/м} \leq H_c \leq 6 \text{ кА/м}$).

Поэтому формулы (2') и (3') при $\xi = 1,08$ при расчете μ_m чугунов приводят к значению $k \approx 1$ в уравнении регрессии (4). При этом статистически значимых отличий в результатах расчета μ_m чугунов с пластинчатой и шаровидной формой графитовых включений не обнаружено.

Расчет (2') μ_m чугунов во всем исследованном диапазоне изменения их магнитных свойств обеспечил снижение $\bar{\delta}$ до значения 6,9%. Это в 1,28 раза меньше, чем $\bar{\delta}$ расчета μ_m тех же чугунов по (1). Формула (3') при расчете μ_m магнитотвердых чугунов обеспечила значение $\bar{\delta} \approx 4,9\%$. Это в 2,77 раза меньше, чем $\bar{\delta}$ расчета μ_m тех же чугунов по (1).

Результаты статистического анализа формул для расчета μ_m чугунов

Номер формулы	Количество образцов, источник информации	Диапазон H_c , кА/м	Параметры статистической обработки		
			k	R	$\bar{\delta}$, %
(1)	96, [1, 5, 6]	0,3–6,0	1,09	0,985	8,8
(2)			1,08	0,986	7,7
(2'), $\xi = 1,08$			1,00	0,986	6,9
(1)	22, [5]	4,0–6,0	0,88	0,940	13,6
(3)			1,089	0,949	8,9
(3'), $\xi = 1,08$			1,008	0,949	4,9
(2'), $\xi = 1,08$	10, [7]	0,2–3,0	1,001	0,996	6,7

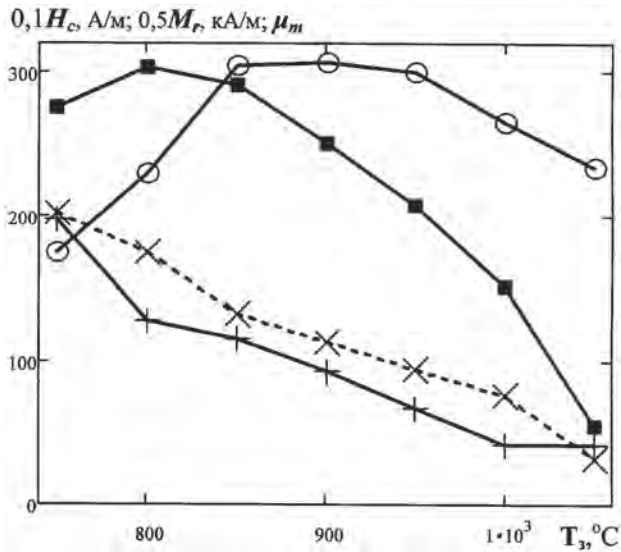


Рис. 1. Магнитные свойства перлитного ковкого чугуна в зависимости от температуры T_3 закалки при нагреве в печи. Результаты измерения в [8, рис. 3, а]: ○ – H_c ; ■ – M_r ; + – μ_m . × – результаты расчета μ_m этих чугунов по (2') при $\xi = 1,08$

Полученный результат позволяет отказаться от трудоемких измерений μ_m чугунов при исследованиях зависимости их магнитных свойств от технических воздействий. Значения μ_m чугунов могут быть определены по формуле (2') или (3') при $\xi = 1,08$ по результатам простого и достоверного измерения H_c и M_r .

Правомерность такой рекомендации подтверждена и приведенными в таблице результатами статистического анализа сопоставления результатов [7, табл. 1] измерения μ_m чугунов с шаровидным, пластинчатым и междендритно-точечным графитом с ферритной и перлитной металлической основой и результатами расчета μ_m этих чугунов по (2') при $\xi = 1,08$. Расчет μ_m чугунов проведен на основании результатов измерения их B_r и H_c , приведенных в [7, табл. 1]. Измерения магнитных свойств чугунов в [7] проведены в замкнутой магнитной цепи. Диапазон изменения H_c образцов – от 0,2 до 3 кА/м. Результаты измерения магнитных свойств чугунов в [7] не использованы при статистическом анализе разных формул для расчета μ_m чугунов, представленных в таблице. Они получены другими исследователями на других образцах другой аппаратурой. Поэтому они могут служить объективным критерием достоверности результатов расчета μ_m чугунов по формуле (2'). Представленные в таблице статистические результаты сопоставления расчетных и экспериментально измеренных значений μ_m этих чугунов (близкие к 1 значения R и k , величина $\bar{\delta}$, не превысившая 6,9%) подтверждают объективный характер установленной связи (2') при $\xi = 1,08$ между μ_m , H_c и M_r чугунов.

Подтверждением этому служат, например, и приведенные на рис. 1 зависимости μ_m , H_c и M_r ковкого чугуна от температуры T_3 закалки по [8, рис. 3, а] и результаты расчета μ_m этих чугунов по (4') при $\xi = 1,08$.

Хотя образцы из ковкого чугуна не были использованы при разработке формулы (2') и обосновании значения $\xi = 1,08$ в ней, характер экспериментальной и рассчитанной зависимостей $\mu_m(T_3)$ совпадает. В тех случаях, когда отличие между результатами расчета и измерения μ_m превышает неизбежную погрешность эксперимента, эти отличия обусловлены не неточностью формулы (2'), а неточностью измерений μ_m в [8]. Это фактически признали и авторы [8], «сгладив» экспериментальные кривые. Отметим и то, что, хотя измерения магнитных параметров чугунов в [8] проведены «в замкнутой магнитной цепи специального электромагнита», методика измерения напряженности магнитного поля «с помощью накладной катушки поля, изогнутой по форме образца», могла служить источником методической ошибки измерения μ_m . Между тем, при измерениях H_c и B_r образцов такая ошибка не возникает. Поэтому результаты расчета μ_m чугунов по формуле (2') на основании достоверно измеренных величин H_c и B_r дают более достоверную информацию о μ_m чугунов, чем результаты измерения μ_m в [8].

Разработанная формула (2') вместе с другими связями между магнитными параметрами чугунов помогает выявить и «промахи» в результатах измерения μ_m . В качестве примера такой возможности на рис. 2 приведены результаты измерения в [9, рис. 24, б] зависимостей H_c , M_s и μ_m серого чугуна от температуры T_0 отпуска. В отличие от [8] «измерение характеристик магнитных свойств» чугунов в [9] «производились баллистическим методом в открытой магнитной цепи». Поэтому результаты измерения B_r или M_r чугунов на рис. 24 в [9] не приведены. Но и результаты измерения μ_m чугунов на этом рисунке не соответствуют их реальным значениям. В обоснование этого на рис. 2 приведены данные расчета M_r этих чугунов по формуле:

$$M_r \approx \mu_m H_c / \{1,08[0,5 + 0,00006\gamma H_c - (0,000068\gamma H_c)^2]\}. \quad (6)$$

Обратим внимание на аномально низкие значения M_r , полученные при расчете: отношение $K_{II} = M_r/M_s$ чугунов на рис. 2 в зависимости их T_0 изменяется в пределах $0,136 \leq K_{II} \leq 0,223$. Между тем, диапазон возможного изменения K_{II} чугунов, магнитные свойства которых достоверно измерены в замкнутой магнитной цепи, составляет $0,3 \leq K_{II} \leq$

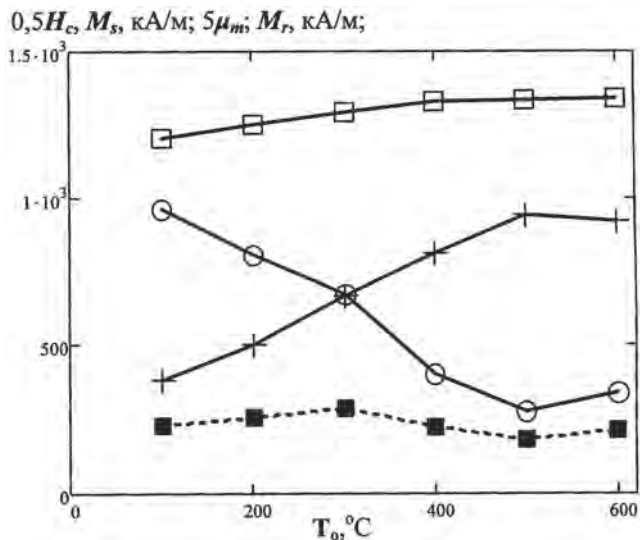


Рис. 2. Магнитные свойства закаленного ТВЧ со скоростью индукционного нагрева 250 град/с ферритного серого чугуна в зависимости от температуры T_0 отпуска. Результаты измерения в [9, рис. 24, б]: \circ — H_c ; \square — M_s ; $+$ — μ_m ; \blacksquare — результаты расчета M_r этих чугунов по (6)

0,7 [1, 5–8]. Такие низкие значения K_p чугунов, полученные на основании приведенных в [9] результатов измерения их μ_m , позволяют сделать заключение: представленные на рис. 24 в [9] результаты измерения μ_m чугунов занижены по сравнению с их истинными значениями не менее, чем вдвое. По-видимому, это явилось следствием методической ошибки измерения μ_m в [9] на образцах «в открытой магнитной цепи» и измерения «напряженности поля на поверхности образцов баллистическим методом с использованием плоской, изогнутой в форме образца катушки поля».

Заметим, что и ГОСТ [4] ни при каких условиях не допускает измерения μ_m ферромагнитных материалов в открытой магнитной цепи. Подобные [9] не достоверные результаты, попадая на страницы последующих обзоров (например, на рис.17 и18 в [10]), искажают действительные зависимости магнитных параметров чугунов от технических воздействий и затрудняют разработку эффективных методов контроля структуры чугунов.

Выводы

1. Установлено, что под влиянием графитовых включений при прочих равных условиях остаточная намагниченность M_r чугуна снижается в 1,08 раза сильнее, чем его максимальная магнитная проницаемость μ_m .

2. Для расчета μ_m чугунов по H_c и M_r получена формула (2'), для расчета μ_m чугунов с $H_c \geq 4$ кА/м — формула (3'). Показано, что модуль $\bar{\delta}$ средней относительной погрешности расчета μ_m чугунов по (2') и (3') при $\xi = 1,08$ в 1,28 и 2,77 раза меньше $\bar{\delta}$ расчета μ_m по используемой в литературе формуле (1) и близок к корню квадратному из суммы квадратов погрешностей измерения входящих в (2') и (3') параметров по стандартным методикам.

3. Полученный результат позволяет отказаться от трудоемких измерений μ_m чугунов при исследованиях зависимости их магнитных свойств от режимов технических воздействий. Значения μ_m чугунов могут быть определены по формулам (2') и (3') по результатам простого и достоверного измерения H_c и M_r .

Литература

1. Gumlich E., Schmidt E. Magnetische Untersuchungen an neueren Eisensorten // Elektrotechnische Zeitschrift. 1901. Heft 35. P. 691–698.
2. Сандомирский С. Г. Структурная чувствительность максимальной магнитной проницаемости. Ч. 1. Статистический анализ связи максимальной магнитной проницаемости сталей с параметрами петли гистерезиса // Контроль. Диагностика. 2013. № 12. С. 35–41.
3. Сандомирский С. Г. Анализ связи максимальной магнитной проницаемости магнитотвердых сталей с параметрами предельной петли гистерезиса // Сталь. 2013. № 8. С. 70–74.
4. ГОСТ 8.377–80 Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. М.: Изд-во стандартов, 1986.
5. Карамара А., Рутковский Я. Проблемы, связанные с практическим применением магнитных методов контроля влияния термической обработки // 30-й междунар. конгресс литейщиков. М.: Машиностроение, 1967. С. 169–190.
6. Карамара А. Основные положения магнитных методов контроля состояния и качества чугунных отливок // 25-й междунар. конгресс литейщиков. М., 1961. С. 454–475.
7. Ивлев В. А., Костецкий И. И. Магнитные методы и приборы контроля структур отливок из чугуна с шаровидным графитом // Дефектоскопия. 1965. № 3. С. 43–53.
8. Русин П. И., Гофман Л. А. Магнитные и электрические свойства термически обработанного ковкого чугуна // Дефектоскопия. 1967. № 5. С. 58–64.
9. Русин П. И., Гофман Л. А., Капустянский М. А. Магнитная структуроскопия термически обработанного чугуна. Ростов-на-Дону: Ростовский университет, 1978.
10. Горкунов Э. С., Сомова В. М., Ничипурук А. П. Магнитные свойства и методы контроля структуры и прочностных характеристик чугунных изделий. (Обзор) // Дефектоскопия. 1994. № 10. С. 54–82.