

В. М. ВЛАСОВЕЦ, д-р. техн. наук, проф., ХНТУСХ им. П. Василенка, Харьков

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ ПРИ СТРУКТУРНОМ АНАЛИЗЕ ИЗДЕЛИЙ ДВУХПОЛЮСНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТОМ

Определено влияние краевых эффектов (распределение магнитного потока при намагничивании изделия, наличие геометрических изменений в областях намагничивания) и площади поперечного сечения, расстояния между полюсами и до намагничивающих катушек полюсных наконечников на погрешность измерения коэрцитивной силы при оценке свойств изделий неразрушающим магнитным методом. Ил.: 2. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: магнитный контроль, коэрцитивная сила, погрешность измерения, двухполюсный электромагнит

Введение. Экспериментальные работы по выбору оптимальных режимов модифицирующей и термической обработки на массивных отливках – валках являются затратными. К тому же натурные испытания достаточно трудоёмки: они требуют разрезания валка для проведения исследований макро- и микроструктуры рабочего слоя, распределения твёрдости, определения механических свойств.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Для массивных изделий исследования проводят лишь на образцах, вырезанных из верхнего и нижнего края бочки при механической обработке [1]. Это не позволяет выполнить их оценку по всей длине и глубине рабочего слоя изделия [2]. В таком случае эффективной альтернативой является

© В. М. ВЛАСОВЕЦ, 2012

использование структурночувствительной магнитной характеристики – коэрцитивной силы (далее H_c), которая при применении современных коэрцитиметров позволяет оценивать механические свойства материала рабочего слоя без разрушения изделия.

Магнитные характеристики сплава, согласно ГОСТ 8.377 определяют при однородном намагничивании тороидальных образцов. Однако такое намагничивание нехарактерно для реальных изделий с различной формой при магнитном контроле [3]. Поэтому важным является оценка влияния различных факторов (прежде всего конструктивных особенностей двухполюсного электромагнита коэрцитиметра и полюсных наконечников, используемых на производстве) на достоверность оценки свойств изделий по магнитному параметру.

Цель работы. Оценить влияние различных факторов на погрешности измерения H_c при структурном анализе изделий двухполюсным электромагнитом.

Методики исследования. Влияние краевых эффектов (распределение магнитного потока при намагничивании изделия, наличие геометрических изменений в областях намагничивания) и площади поперечного сечения, расстояния между полюсами и до намагничивающих катушек полюсных наконечников изучали на примере коэрцитиметров КРМ-Ц с двумя типами накладных преобразователей – большим, с расстоянием между полюсами 35 мм (тип Б), размер площадки для фиксации щупа 30×10 мм, предназначенным для контроля массивных изделий, и малым – 25 мм (тип М), 15×5 мм, используемым для оценки качества покрытий, упрочнённых зон и

участков локальных неоднородностей. Для первого типа преобразователя использовали 6 видов полюсных наконечников, для второго – 2 вида (табл. 1).

Таблица 1. Типы используемых полюсных наконечников различных датчиков

Условное обозначение	Геометрический параметр			Тип полюсного наконечника	Условное обозначение	Геометрический параметр			Тип полюсного наконечника
	толщина, а, мм	ширина, b, мм	Площадь поперечного сечения, $S_{\text{зп}}$, мм ²			толщина, а, мм	ширина, b, мм	Площадь поперечного сечения, $S_{\text{зп}}$, мм ²	
Б00 ¹	12	27	324		Б04	12	27	324	
Б01	12	27	324		Б05	12	27	324	
Б02	4	27	108		М00	5	27	135	
Б03 ²	5	27	135		М01	22	26	572	

Примечание. 1 – тип полюсного наконечника аналогичен стандартному накладному преобразователю коэрцитиметра; 2 – увеличено расстояние от катушек до детали, более узкое расстояние между щупами, чем Б02

Для расчёта полей в нелинейной ферромагнитной среде намагничиваемый объем разделен на области, в каждой из которых вектор намагниченности постоянен. Топография результирующего поля определена намагниченностью всех элементарных объемов с учетом их взаимного влияния.

Известно [4], что напряженность поля на поверхности изделия в центре межполюсного промежутка, изменение поля в нейтральной плоскости электромагнита и глубина контролируемого слоя зависят от площади полюса $S_{\text{п}}$. В то же время использование для ферромагнитного изделия представлений Ротерса [5, 6] о путях прохождения магнитного потока в воздухе позволило получить численное совпадение расчетного и экспериментального значений тока размагничивания при равенстве площадей поперечного сечения сердечников электромагнита и изделия. Предполагается, что объем, ограничивающий поток в изделии, перемагничивается по предельной петле гистерезиса.

Результаты работы и их обсуждение. Для расчета объем, в котором сосредоточен поток при намагничивании изделия, разделен на шесть областей: 1, 2 и по две области 3 и 4 (рис. 1, 2).

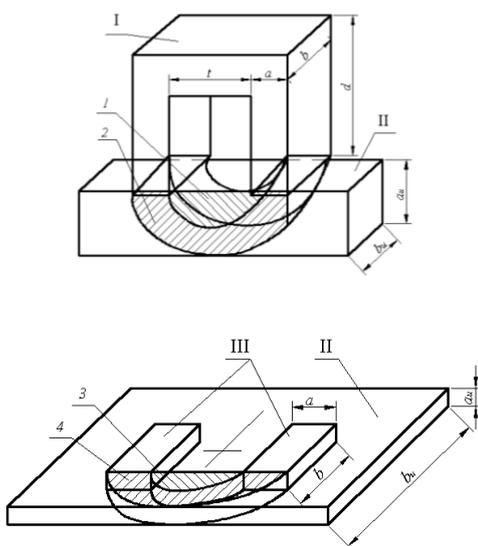


Рис. 1. Магнитная цепь двухполюсного электромагнита I, установленного на изделие II; III – расположение полюсов: 1–4 – участки возможных путей магнитного потока

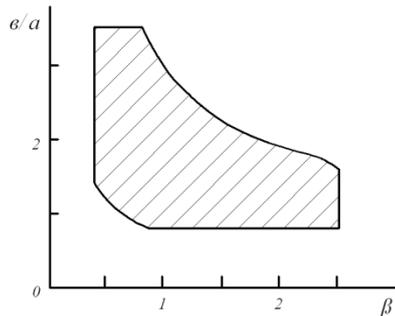


Рис. 2. Диапазон изменения условных показателей $\beta = \sqrt{S_{оп}} / 2t$ и b/a электромагнитов (уточнённые данные для коэрцитиметра КРМ-Ц)

На этом рисунке показаны магнитная цепь электромагнита и простые формы путей потока 1–4, которыми заменено действительное поле. Область 1 представляет собой полуцилиндр с радиусом $t/2$ и длиной b . Область 2 расположена под полюсами и межполюсным промежутком и ограничена двумя цилиндрическими поверхностями радиусами $t/2$ и $t/2+a$, а также длиной b . Область 3 примыкает к межполюсному промежутку и представляет собой четвертую часть сферы радиусом $t/2$. Область 4 примыкает к полюсам и ограничена сферическими поверхностями радиусами $t/2$ и $t/2+a$. Намагничиваемый объем разделен по глубине на слои приблизительно такой же толщины (определено изменение индукции вдоль средней линии 1 каждой области). Это связано с тем, что все области намагничиваются неоднородно. Распределение индукции в ферромагнетике, рассчитанное в приближении $\mu' = \text{const}$, значительно лучше совпадает с истинным, чем результаты расчетов поля в том же приближении [7]. Это дало возможность определить абсолютные значения индукции вдоль заданной линии при намагничивании изделия и известной индукции в полюсе электромагнита.

Объемы V участков, с учетом формулы площади для эллипса, определены из выражения $V = ABC \pi/2$; значения полуосей эллипса A , B и толщины C участков приведены в табл. 2.

Средние длины l силовых участков 1–4

вычислены по формуле полупериметра эллипса [8]:

$$l = (A + B)(1 + \lambda^2 / 4 + \lambda^4 / 64 + \lambda^6 / 256) / 2; \lambda = (A - B) / (A + B) \quad (1)$$

Значения полуосей эллипсов, необходимые для расчета l , даны в табл. 3.

Таблица 2- Полуоси эллипсов и толщина C участков для определения объемов

Участок	A	B при:		Участок	A	B при:	
		$h < t/2+a$	$h \geq t/2+a$			$0 < (b_{н}-b) < t+2a$	$b_{н}-b \geq t+2a$
1	$t/2$	$th/(t+2a)$	$t/2$	3	$t/2$	$t(b_{н}-b)/4(t+2a)$	$t/2$
2	$t/2+a$	h	$t/2+a$	4	$t/2+a$	$(b_{н}-b)/2$	$t/2+a$

$C=b$ при $b < b_{и}$; $C= b_{и}$ при $b_{и} < b$	$C=h$
--	-------

Таблица 3- Полуоси эллипсов для определения средних длин силовых линий участков

Уча- сток	А	В при:		Уча- сток	А	В при:	
		$h < t/2+a$	$h \geq t/2+a$			$0 < (b_{и}-b) < t+2a$	$b_{и}-b \geq t+2a$
1	$t/2$	$th/2(t+2a)$	$t/4$	3	$t/2$	$t(b_{и}-b)/4(t+2a)$	$t/4$
2	$(t+a)/2$	$(t+a)h/(t+2a)$	$(t+a)/2$	4	$(t+a)/2$	$(t+a)(b_{и}-b)/2(t+2a)$	$(t+a)/2$

Средние длины силовых линий зависят, в основном, от размеров электромагнита и изменяются в пределах: для участков 1,3 $t \leq l \leq \pi t/2$; для участков 2, 4 $t+a \leq l \leq \pi(t+a)/2$.

Проводимости $G_1 - G_4$ участков определены по формуле

$$G_i = \mu_0 \mu V_i / l_i^2, \quad i=1 \dots 4, \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость. Проводимость изделия равна сумме проводимостей

$$G = G_1 + G_2 + 2(G_3 + G_4) \quad (3)$$

Максимальное значение G соответствует условию равноправности прохождения потока по толщине и ширине пластины ($2h = b_{и} - b$). Оптимальная толщина изделия, при которой будет наблюдаться предельная петля магнитного гистерезиса, найдена из соотношения $h_{опт}(b + 2h_{опт}) = S_{и}$.

Значение тока размагничивания, пропорционального H_c определено по зависимости [9]:

$$I_{pc} = \left(U_{c.э.} + \frac{U_{c.и.}}{1 + G_F/G} \right) / \omega_p \quad (4)$$

где $U_{c.э.}$, $U_{c.и.}$ – соответственно падения магнитных потенциалов на сердечниках электромагнита и изделия; $U_{c.э.} = H_{c.э.} l_{c.э.}$ (принято $U_{c.э.} = 12$ А для коэрцитиметра КРМ–Ц), $U_{c.и.} = H_{c.и.} l$, где $H_{c.э.}$, $H_{c.и.}$ – коэрцитивные силы; $l_{c.э.}$, l – средние длины силовых линий в сердечниках электромагнита и изделия; G_F – проводимость магнитному потоку рассеяния около изделия (принято $G_F = 0,18 \times 10^{-6}$ А/Вб согласно [10]); ω_p – количество витков размагничивающей обмотки электромагнита ($\omega_p = 745 \times 2$) в конструкции накладного преобразователя КРМ–Ц. Согласно [11]:

$$U_{c.и.} = (H_c [l_1 G_1 + l_2 G_2 + 2(l_3 G_3 + l_4 G_4)] / G) \quad (5)$$

$$I'_{pc} = U_{c.э.} / \omega_p + K_1 H_c, \quad (6)$$

где $U_{c.э.} / \omega_p$ – начальное значение тока, обусловленное конструкцией электромагнита и коэрцитивной силой материала сердечников; K_1 – коэффициент определяющий чувствительность к H_c .

Начальное значение $U_{c.э.} / \omega_p$ определено на основании использования образца из низкокоэрцитивной электротехнической стали ($H_c = 0,1$ А/см). Для используемого прибора КРМ–Ц оно составило 3,2 А/см.

В соответствии с вышеприведенными выражениями рассчитано значение H_c , которое учитывает изменение I_{pc} , вследствие разной толщины, формы исследуемых изделий, а для максимального уменьшения влияния краевых эффектов введен дополнительный коэффициент K_{II}

$$H_c = I'_{pc} K_{II}, \quad (7)$$

где I'_{pc} – показания коэрцитиметра без учёта корректировки краевых эффектов от формы изделия.

Расчет проведен для электромагнита накладного преобразователя коэрцитиметра КРМ–Ц с размерами, мм: $a = 12$, $b = 28$, $t = 34$, $d = 100$.

Расчетным методом установлен вклад каждой из зон на уровень H_c (см.рис. 1): 1 – 60%, 2 – 30%, 3 – 7%, 4 – 3% (для зон 3 и 4 в соответствии с обозначением на рис. 1 – 7/2% и 3/2% соответственно). Для проверки полученной модели выполнены измерения (табл. 4) на двух стандартных образцах размерами $58 \times 35 \times 7$ с известными показателями H_c (13,7 и 4,9% А/см).

Таблица 4. Экспериментальная проверка модели двухполюсного электромагнита

Измерение №	Расстояние центра образца A_n и полюсов электромагнита A_1	Размагничивающий ток I_{pc} на стандартных образцах ¹		Коэффициент K_{II}	Коэрцитивная сила ² H_c , А/см	
		13,7 А/см	4,9 А/см		13,7 А/см	4,9 А/см
1	A_n и A_1 совпадают	13,7	4,9	1	13,7	4,9
2	по оси x $(b_n/2 - b/2)$	13,8	4,9	0,99	13,7	4,9
3	по оси x $(b_n/2 - b/2) + 1/4b$	14,0	5,0	0,98	13,7	4,9
4	по оси x $(b_n/2 - b/2) + 1/2b$	14,6	5,3	0,94	13,7	5,0
5	по оси x $(b_n/2 - b/2) + 3/4b$	15,5	5,6	0,88	13,6	4,9
6	по оси x $(b_n/2 - b/2) + 7/8b$	14,3	5,2	0,95	13,6	4,9
7	по оси y $(l_n/2 - a/2) + 1/4a$	13,3	4,7	1,04	13,8	4,9
8	по оси y $(l_n/2 - a/2) + 1/2a$	13,1	4,6	1,06	13,9	4,9
9	по оси y $(l_n/2 - a/2) + 3/4a$	12,1	4,2	1,15	13,9	4,8
10	по оси y $(l_n/2 - a/2) + 7/8a$	11,5	4,1	1,20	13,8	4,9

Примечание. 1 – значения размагничивающего тока I_{pc} – среднее из 5-ти измерений; 2 - H_c определялась расчетным методом по (6). A_n и A_1 соответственно центры изделия и электромагнитов в плоскости ху.

В случае уменьшения площади контакта электромагнит-изделие и появления краевого эффекта при перемещении вдоль оси x I_{pc} увеличивается, за счёт возрастания потерь на перемагничивание образца. Уменьшение площади контакта по оси y уменьшает, как объем основных зон, так и длину силовых линий участков, что уже не компенсируется возрастанием потерь.

При проведении измерений H_c сплавов использованы полюсные наконечники разного поперечного сечения и геометрии (см.табл. 1). Для проверки полученной модели при изменении поперечного сечения выполнен расчет H_c (табл. 5) с учётом переходного коэффициента, учитывающего площадь поперечного сечения, расстояние между полюсами и расстояние до намагничивающих катушек изделия.

Усложнение формы полюсных наконечников приводит к ухудшению чувствительности при измерении H_c . Так, для наконечников Б03 и М01 не удалось установить единые значения коэффициентов K_{III} при оценке стандартных образцов с 13,7 и 4,9 А/см. Это можно объяснить большой удаленностью изделия от намагничивающих электромагнит катушек для наконечников Б03 и сложной формой для М01, что, согласно формуле (4), приводит к резкому падению магнитного потенциала на сердечнике.

Таблица 5. Параметры исследованных полюсных наконечников

Условное обозначение	Площадь поперечного сечения	Размагничивающий ток I_{pc} на стандартных образцах	Коэффициент	Коэффициент приведения	Коэрцитивная сила ²
----------------------	-----------------------------	---	-------------	------------------------	--------------------------------

наименование	электромагнитная индукция $S_{и}$, мм ²			$K_{ш}$	формы наконечников Б00	H_c , А/см	
		13,7 А/см	4,9 А/см			13,7 А/см	4,9 А/см
Б00	12×28	13,7	4,9	1	1	13,7	4,9
Б01	24×28	10,7	3,8	1,3	0,78	13,9	4,9
Б02	5×28	9,7	3,5	1,4	0,71	13,6	4,9
Б03 ³	5×28	6,1	3,6	2,2–1,3	-	-	-
Б04 ⁴	12×28	14,4	5,4	0,92	1,05	13,2	5,0
Б05	12×28	12	5	0,99	0,88	11,9	5,0
М00 ⁵	5×28	13,7	4,9	1	1	13,7	4,9
М01	12×28	8,5	7,5	1,6-0,7	-	-	-

Примечание. 1 – значения размагничивающего тока I_{pc} – среднее из 5-ти измерений; 2 – H_c определялась расчетным методом по (6). 3 – Б03 отличается от Б04 увеличенным на 20 мм расстоянием от намагничивающих катушек до изделия; 4 – наконечники Б04 и Б05 предназначены для замера изделий круглого сечения диаметрами 12 и 16 мм соответственно; 5 – Б00–Б02 наконечники накладного преобразователя прибора КРМ–Ц–1, М00–М01 – прибора КРМ–Ц–2

Исходя из условия максимального намагничивания центра межполюсного участка на поверхности изделия, найдено оптимальное соотношение сторон полюса накладного преобразователя прибора КРМ–Ц, которое близко к полученным данным для прибора КИФМ [12].

Установлена зависимость в приведенных координатах для коэрцитиметра КРМ–Ц, которая позволила количественно оценить влияние соотношения $S_{и} / S_{эл}$ на уровень H_c :

$$I'_{pc} / I^*_{pc} = 1 + 4,8(S_{и} / S_{эл})^{1,6} e^{-1,91(S_{и} / S_{эл})}, \quad (8)$$

где I'_{pc} – текущее показание коэрцитиметра, I^*_{pc} – показание, соответствующее массивному образцу ($S_{и} / S_{эл} \gg 1$), когда I_{pc} уже не зависит от размера образца.

Максимальная чувствительность коэрцитиметра к измерениям H_c образцов достигается, когда $S_{и}$ близко к $S_{эл}$. Снижение чувствительности при уменьшении площади поперечного сечения изделий обусловлено уменьшением падения магнитного потенциала $U_{с.и}$ из-за уменьшения эффективной длины образца l , а также увеличения магнитного сопротивления потоку рассеяния. При больших значениях $S_{и}$, что имеет место при контроле большинства изделий, также имеет место снижение чувствительности – из-за уменьшения $U_{с.и}$ (вследствие сползания намагниченности образцов на частный гистерезисный цикл) по причине недостаточности магнитного потока при намагничивании изделий таких сечений (происходит неполное намагничивание зоны исследования).

Выводы. Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы. Максимальная чувствительность метода обеспечивается при равенстве площадей поперечного сечения изделия и полюса преобразователя. Если изделие тоньше, то чувствительность снижается до 40% из-за уменьшения падения магнитного потенциала и увеличения сопротивления магнитного потока рассеивания.

При контроле большинства образцов или непосредственно рабочего слоя массивных изделий по H_c , чувствительность уменьшается до 12% из-за неполного намагничивания зоны исследования. В этом случае достоверность оценки решающее значение имеет ход кривой зависимости H_c от максимального значения индукции при намагничивании конкретного материала.

Список литературы: 1. *Власовец В. М.* Оценка твердости отливок из стали 60X2H4ГМФ по коэрцитивной силе. / *Власовец В. М.* // Вестник ХНАДУ. – Харьков, 2010. – Вып. 51. – С.81–84. 2. *Власовец В. М.* Повышение свойств изделий из железоуглеродистых сплавов с оценкой структурного состояния магнитным методом. / *Власовец В. М.* // Материалы 10-го Юбилейного Международного научно-технического семинара [“Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте”]. – 2010. – С.27–29. 3. *Осинцев А. А.* Некоторые возможности повышения достоверности магнитного контроля прочностных свойств горячекатаных труб из стали 37Г2С. / *А. А. Осинцев, В. Н. Костин, Е. Ю. Сажина* // Дефектоскопия. – 2002. – № 12. – С. 52–57. 4. *Мухеев М. Н.* Определение размеров приставного электромагнита, предназначенного для неразрушающего контроля глубины и твердости поверхностно-упрочненных слоев. / *М. Н. Мухеев, Г. В. Бида, В. Н. Костин* // Дефектоскопия. – 1984. – № 8. – С. 10–16. 5. *Газизова Г. Г.* Расчет магнитного поля приставного электромагнита с П образным сердечником. / *Г. Г. Газизова, Т. И. Гусейнова, З. Г. Каганов* // Дефектоскопия. – 1982 – № 7. – С. 71–76. 6. *Guru V. S.* Electromagnetic field theory fundamentals. / *V. S. Guru, H. R. Hizirogly.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2004. – 681 p. 7. *Костин В. Н.* О некоторых закономерностях необратимого изменения намагниченности поликристаллических ферромагнетиков. / *В. Н. Костин* // Дефектоскопия. – 2004. – № 1. – С. 29–38. 8. *Виноградов И. М.* Аналитическая геометрия. / *И. М. Виноградов* – М: Наука, 1986. – 172 с. 9. *Захаров В. А.* К теории намагничивания массивных ферромагнитных тел приставными устройствами. / *В. А. Захаров* // Проблемы технической электродинамики. – 1978. – № 66. – С. 81–85. 10. *Захаров В. А.* Магнитостатика систем с ферромагнетиками. / *В. А. Захаров* – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. – 95 с. 11. *Францевич В. М.* Влияние формы конечников магнитопровода на величину размагничивающего тока приставного коэрцитиметра. / *В. М. Францевич, В. А. Захаров, Г. И. Деордиев* // Дефектоскопия. – 1975. – № 1. – С. 41–45. 12. *Бида Г. В.* Магнитный контроль механических свойств проката. / *Г. В. Бида, Э. С. Горкунов, В. М. Шевнин* – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 252 с.

УДК 621.785.33

Оцінка похибок вимірювання коерцитивної сили при структурному аналізі виробів двополюсним електромагнітом. / *Власовець В. М.* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. - №50(956). С.162-168

Визначено вплив крайових ефектів (розподіл магнітного потоку при намагнічуванні виробу, наявність геометричних змін в областях намагнічування) і площі поперечного перерізу, відстані між полюсами і до котушок полюсних наконечників на похибку вимірювання коерцитивної сили при оцінці властивостей виробів неруйнівним магнітним методом. Іл.: 2. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: магнітний контроль, коерцитивної сила, похибка вимірювання, двополюсний електромагніт

UDC 621.785.33

Estimating uncertainty of measurement of the coercive force at a structural analysis of products two pole electromagnets. / *Vlasovets V. M.* // Bulletin of NTU “KhPI”. Subject issue: New decisions of modern technologies. – Kharkov: NTU “KhPI”. – 2012. – №50(956). P.162-168

The influence of the edge effect (magnetic flux distribution in the magnetization products, the geometric changes in the fields of magnetization) and the cross-sectional area, the distance between the poles and to the magnetizing coils pole pieces on the measurement error of the

coercive force in assessing the character of articles noninvasive magnetic method. Im.: 2.
Bibliogr.: 12.

Keywords: magnetic control, coercive force, measurement error, two-pole magnet

Надійшла до редакції 05.09.2012