



*It is determined that third harmonic constituent of signal of superimposed electromagnetic transducer is less than coercively sensitive parameters is subjected to influence of proportion of pearlite and ferrite in metal die of high-duty and grey cast irons.*

С. Г. САНДОМИРСКИЙ, ОИМ НАН Беларуси, В. Л. ЦУКЕРМАН, ИПФ НАН Беларуси,  
Л. З. ПИСАРЕНКО, ОАО «МЗОО»

УДК 620.179.14

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА НА СИГНАЛЫ НАКЛАДНЫХ МАГНИТНОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДАТЧИКОВ

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧ) является ценным и перспективным конструкционным материалом для машиностроения [1]. Его получают модифицированием жидкого чугуна небольшими добавками отдельных элементов [2]. Шаровидный графит, имеющий минимальную поверхность при заданном объеме, меньше, чем пластинчатый, ослабляет металлическую основу чугуна и не является активным концентратором напряжений. ВЧ имеют пластичность, прочность, износостойкость и коррозионную стойкость, близкие к свойствам углеродистой и легированной стали. При этом они сохраняют хорошие литейные свойства и обрабатываемость резанием, способность гасить вибрации, высокую износостойкость. Стоимость отливок из ВЧ на 25–50% ниже стоимости отливок и поковок из стали и ковкого чугуна. Нарушения режимов модифицирования приводят к появлению отливок или их участков со структурой серого чугуна (СЧ), содержащих пластинчатый графит, что недопустимо снижает потребительские свойства отливок. Это обуславливает необходимость контроля структуры готовой отливки, особенно в случае ее последующей эксплуатации в узлах ответственного назначения.

Стандартные методы определения структуры чугуновых отливок трудоемки, не производительны и требуют разрушения отливки для подготовки микрошлифов [3]. Необходимость отбраковки отливок со структурой СЧ от отливок из ВЧ и классификации отливок из ВЧ по структурам в соответствии с [3] обусловила разработку неразрушающих методик сортировки чугуна по структуре.

Результаты контроля структуры чугуновых отливок ультразвуком [4] показывают, что форма графита не единственный фактор, определяющий скорость звука в чугуне. Неразрушающий контроль формы графита в отливках по скорости звуковых волн требует соблюдения важного условия: все параметры отливок, кроме формы графита, должны мало изменяться, чтобы их влиянием на скорость звука можно было пренебречь.

Магнитный контроль чугуновых отливок основан на различии магнитных свойств структурных составляющих чугуна [5, 6]. Определяющее влияние на магнитные свойства оказывает не содержание, а состояние углерода в чугуне. Результаты обобщения исследований диапазонов изменения коэрцитивной силы  $H_C$ , остаточной намагниченности  $M_R$ , намагниченности насыщения  $M_S$  и максимальной магнитной проницаемости  $\mu_m$  чугунов со структурами серого и высокопрочного чугунов при различных структурах металлической матрицы приведены в табл. 1. Исследования влияния формы графитовых включений показали [5], что чем она компактнее, тем мягче в магнитном отношении чугун. Поэтому ВЧ с шаровидной формой графита имеют большую  $\mu_m$  и меньшую  $H_C$  по сравнению с СЧ той же металлической основы. Но исследования [7] показали, что по результату измерения коэрцитивно чувствительных магнитных параметров можно уверенно выделить от СЧ лишь ферритный ВЧ с содержанием перлита в металлической матрице до 20%. СЧ при содержании перлита в металлической матрице свыше 50% также может быть отбракован от ВЧ по показаниям коэрцитивно чувствительных приборов. Перлитный

Т а б л и ц а 1. Диапазоны возможного изменения магнитных свойств серого и высокопрочного чугунов по [5]

Тип чугуна	Тип металлической основы	$H_C$ , кА/м	$\mu_m$	$M_S$ , кА/м	$M_R$ , кА/м
Серый чугун (СЧ)	Ферритная	0,2 – 0,4	600 – 1500	1433	240 – 440
	Перлитная	0,56 – 1,06	200 – 450	1393	320 – 560
Высокопрочный чугун (ВЧ)	Ферритная	0,12 – 0,2	1600 – 2400	1513	240 – 480
	Перлитная	0,4 – 0,88	300 – 600	1473	400 – 640

ВЧ по результату измерения  $H_C$  и связанных с ней параметров может быть отбракован от СЧ только при постоянстве металлической основы чугуна.

Цель работы – использование измерения дополнительного электромагнитного параметра, не связанного с  $H_C$ , для повышения достоверности отбраковки перлитного ВЧ от ферритного СЧ.

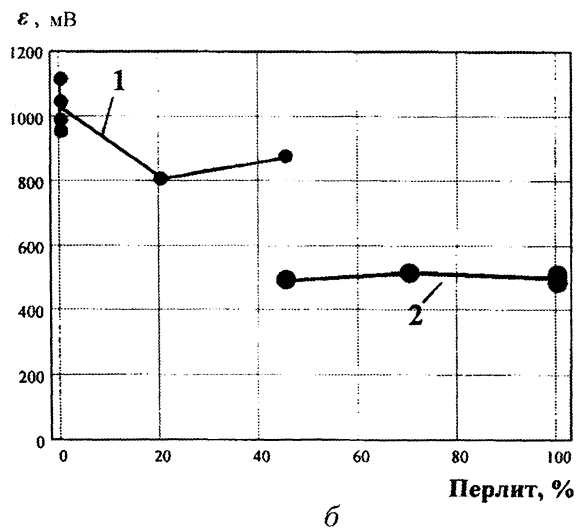
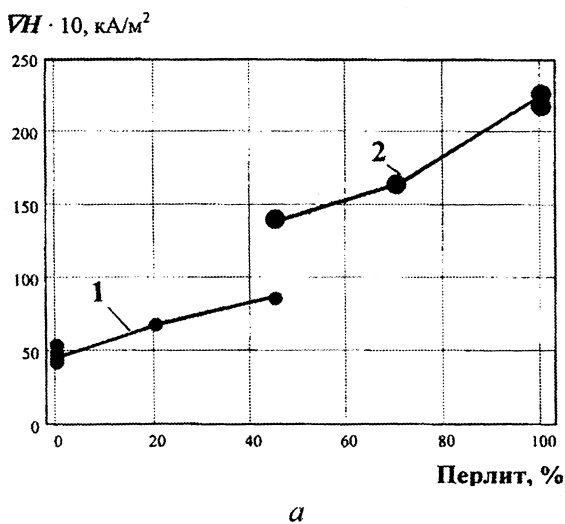
Особенностью исследования является измерение магнитного и электромагнитного параметра на одном и том же участке экспериментальных образцов. Прибором, реализующим коэрцитиметрический метод, служит «Магнитный сортировщик МС-3» [7]. Измеряемый прибором параметр – градиент  $\nabla H$  нормальной составляющей поля остаточной намагниченности (в диапазоне 0,2–150 кА/м<sup>2</sup>) над поверхностью контролируемого объекта после его намагничивания постоянным магнитом по методу точечного полюса.

Для измерения электромагнитного параметра использован прибор «Автоматизированный сортировщик АС-1» [8], измеряющий третью гармоническую составляющую  $\varepsilon$  сигнала накладного электромагнитного преобразователя, состоящего из возбуждающей и измерительной обмоток. Средний диаметр обмоток равен 10 мм. Измерительная обмотка выполнена в виде двух одинаковых половин, расположенных симметрично относительно обмотки возбуждения соосно с ней и включенных между собой встречно. Частота возбуждающего синусоидального тока установлена 2500 Гц.

В качестве образцов для исследования, как и в [7], использованы изделия «монорегулятор», представляющие собой составные цилиндры диаметром от 18 до 40 мм со скосами, длиной 73 мм, изготовленные из высокопрочного чугуна марки ВЧ50. Часть образцов была изготовлена с нарушением режима модифицирования и охлаждения. Благодаря этому был обеспечен широкий диапазон изменения структур образцов. Образцы были разрезаны в экваториальной плоскости и на полученном шлифе определена их микроструктура [3]. Затем на поверхности шлифов размагниченных образцов прибором МС-3 были измерены значения  $\nabla H$  после намагничивания по методу точечного полюса постоянным магнитом прибора.

Измерение электромагнитного параметра  $\varepsilon$  проведено при расположении преобразователя на расстоянии 3,5 мм от поверхности образцов сквозь немагнитную неэлектропроводящую прокладку. Измерения выполнены на предварительно размагниченной поверхности и поверхности, намагниченной постоянным магнитом до технического насыщения.

Результаты измерения  $\nabla H$  и  $\varepsilon$  (усредненные для каждого образца по нескольким измерениям) и микроструктуры образцов приведены в табл. 2. На рисунке показана взаимосвязь измеренных параметров  $\nabla H$  и  $\varepsilon$  (образцы перед измерением размагничены) с содержанием перлита в отливках из высокопрочного и серого чугунов.



Зависимость показаний приборов МС-3 (а) и АС-1 (б) от содержания перлита в отливках со структурой высокопрочного (1) и серого (2) чугунов

Таблица 2. Показания приборов МС-3 и АС-1 при контроле отливок изделий «монорегулятор» с различными структурами

Номер детали	Описание микроструктуры по ГОСТ 3443-87	Тип чугуна в соответствии со структурой	Показания прибора МС-3 $\nabla H \cdot 10, \text{ кА/м}^2$	Показания прибора АС-1 $\epsilon$ , мВ	
				поверхность намагничена	поверхность размагничена
8 (1п)	ШГф5 – ШГд15 – Ф	Высокопрочный	42	816	956
6 (1п)	ШГф5 – ШГд15 – Ф	То же	48	804	993
0	ШГф5 – ШГд15 – Ф	»	45	910	1047
4 (1п)	ШГф5 – ШГд45 – Ф	»	54	1006	1115
9	ШГф5 – ШГд45 – П20	»	68	740	812
8	ШГф5 – ШГд45 – П45	»	86	725	878
21	Колонии ВГр4 – П6	Вермикулярный	100	425	535
22	Колонии ВГр4 – П6	То же	113	423	576
24	ПГф1 – ПГд45 – П45	Серый	140	410	498
23	ПГф1 – ПГд45 – П70	То же	164	398	518
11	ПГф1 – ПГд45 – П	»	227	338	513
15	ПГф – ПГд100 – П	»	218	354	488

Анализ полученных результатов показывает, что, как и в [7],  $\nabla H$  образцов со структурой ВЧ при одинаковом соотношении феррита и перлита в металлической матрице в среднем в 1,6 раза меньше, чем для СЧ. Но при одинаковой форме графитных включений (и для ВЧ, и для СЧ) изменение содержания перлита в металлической матрице от 0 до 100% (соответственно изменение содержания феррита в металлической матрице от 100% до 0) повышает коэрцитивно чувствительный параметр  $\nabla H$  в 2,8 раза.

Измеренный электромагнитный параметр  $\epsilon$  в гораздо меньшей степени подвержен влиянию соотношения феррита и перлита в металлической матрице исследованных чугунов. Так, при изменении содержания перлита в металлической матрице ВЧ от 0 до 45% параметр  $\epsilon$ , измеренный на предварительно размагниченной поверхности образцов, изменяется в пределах  $\pm 15,6\%$  от среднего значения 967 мВ. При изменении содержания перлита в металлической матрице СЧ от 45 до 100% параметр  $\epsilon$ , измеренный на предварительно размагниченной поверхности образцов, изменяется в пределах  $\pm 3,0\%$  от среднего значения 504 мВ. При одинаковом содержании 45% перлита в металлической матрице исследованных образцов значение  $\epsilon$  на образце из ВЧ в 1,76 раза больше, чем на образце из СЧ. Результат измерения параметра  $\epsilon$  на отливках с вермикулярной формой графитовых включений имеет промежуточное значение относительно отливок из ВЧ и СЧ (табл. 2).

Полученный результат создает хорошие предпосылки для использования электромагнитного параметра  $\epsilon$  как самостоятельно, так и совместно с коэрцитивно чувствительным параметром  $\nabla H$  для отбраковки отливок со структурой СЧ от отливок из ВЧ независимо от содержания перлита в металлической матрице отливок. При практической реализации методики следует учитывать, что предварительное намагничивание контролируемой поверхности до технического насыщения по сравнению с размагниченным состоянием снижает параметр  $\epsilon$  исследованных образцов в среднем на 18%.

### Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что третья гармоническая составляющая сигнала накладного электромагнитного преобразователя в меньшей, чем коэрцитивно чувствительные параметры, степени подвержена влиянию соотношения перлита и феррита в металлической матрице отливок из высокопрочного и серого чугунов. Это создает предпосылки для ее использования для отбраковки отливок со структурой СЧ от отливок из ВЧ независимо от содержания перлита в металлической матрице отливок. При практической реализации методики следует обеспечить одинаковое (намагниченное или размагниченное) магнитное состояние поверхности отливок в зоне контроля.

### Литература

1. Бу б л и к о в В. Б. Высокопрочному чугуну – 60\* (обзор) // Литейное производство. 2008. № 11. С. 2–8.
2. Г о р ш к о в А. А. О механизме образования шаровидного графита // Литейное производство. 1955. № 3. С. 17–21.
3. ГОСТ 3443-87. Методы определения структуры. М.: Изд-во стандартов, 1990.
4. В о р о н к о в а Л. В. Контроль чугунных отливок ультразвуком. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
5. Г о р к у н о в Э. С., С о м о в а В. М., Н и ч и п у р у к А. П. Магнитные свойства и методы контроля структуры и прочностных характеристик чугунных изделий (обзор) // Дефектоскопия. 1994. № 10. С. 54–82.

6. С ан д о м и р с к и й С. Г. Возможности и ограничения магнитного контроля структуры чугунных отливок (обзор) // Литье и металлургия. 2006. № 2(38). Ч. 1. С. 118–123.
7. С ан д о м и р с к и й С. Г., Ц у к е р м а н В. Л., П и с а р е н к о Л. З. Анализ предпосылок количественного контроля структуры изделий из высокопрочного чугуна магнитным методом // Литье и металлургия. 2005. № 2(34). Ч. 2. С. 143–148.
8. С ан д о м и р с к и й С. Г., Ц у к е р м а н В. Л., С и н я к о в и ч Э. Б. Прибор-автомат для электромагнитного контроля качества ТВЧ – закалки локального участка малогабаритного изделия // Дефектоскопия. 2005. № 7. С. 61–68.