



УДК 620.179.14

Поступила 28.02.2013

С. Г. САНДОМИРСКИЙ, ОИМ НАН Беларуси, В. Л. ЦУКЕРМАН, ИПФ НАН Беларуси

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА НА КОЭРЦИТИВНО ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ МАГНИТНЫЙ ПАРАМЕТР И СКОРОСТЬ ЗВУКА

*Проведен анализ влияния изменений структуры металлической основы малогабаритных отливок из высокопрочного чугуна при постоянстве формы графитовых включений на коэрцитивно чувствительный магнитный параметр и скорость звука. Показана эффективность совместного использования результатов магнитных и ультразвуковых измерений для контроля формы включений в чугуне и содержания перлита в его металлической матрице.*

*The analysis of influence of changes in the structure of the metal base of high-duty cast iron compact castings with a constant form of graphite inclusions on the coercive sensitive magnetic parameters and the speed of sound is held. The efficiency of joint use of the results of magnetic and ultrasonic measurements to control the shape of inclusions in the iron and pearlite content in its metallic matrix is shown.*

Высокопрочный чугун (ВЧ – чугун с шаровидным графитом) получают модифицированием жидкого чугуна [1]. Это ценный и перспективный конструкционный материал для машиностроения [2]. Шаровидный графит (рис. 1, а) с минимальной поверхностью при заданном объеме меньше, чем пластинчатый (рис. 1, в), ослабляет металлическую основу чугуна и не является активным концентратором напряжений. ВЧ имеет пластичность, износостойкость, прочность и коррозионную стойкость, близкие к свойствам легированной стали. При этом он обладает хорошими литейными свойствами и обрабатываемостью резанием, высокой износостойкостью, способностью гасить вибра-

ции, низкой стоимостью. Необходимость сочетания технологичности обработки и высоких параметров при эксплуатации чугунных отливок предъявляет определенные требования и к структуре металлической матрицы ВЧ, которая характеризует его твердость. Нарушения однородности и режимов модифицирования приводят к появлению отливок или их участков со структурой серого чугуна (СЧ-содержащих пластинчатый графит), что недопустимо снижает потребительские свойства отливок (появление участков, содержащих вермикулярный графит (рис. 1, б), обычно считается допустимым). Изменения химического состава и режимов охлаждения отливок изменяют и соотноше-

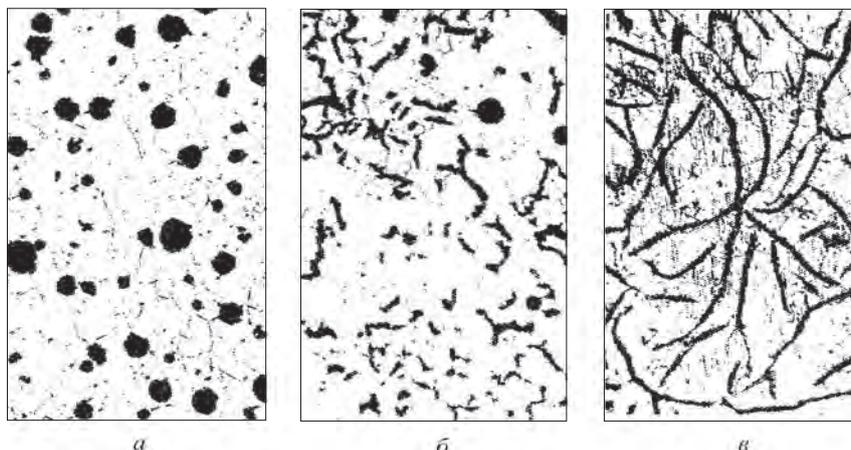


Рис. 1. Микроструктура высокопрочного (а), вермикулярного (б) и серого (в) чугунов по [4].  $\times 100$

ние перлита и феррита в металлической матрице ВЧ. Это обуславливает необходимость контроля структуры отливки, особенно в случаях ее последующей механической обработки и эксплуатации в ответственных узлах.

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

Результаты контроля структуры чугунных отливок ультразвуком [4] показывают, что форма графита является не единственным фактором, определяющим скорость  $V$  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  $V$  можно было пренебречь. Совершенствование теневого импульсно-фазового метода позволяет повысить точность измерения  $V$  в металле отливки, но не позволяет разделить влияние содержания и размеров шаровидных включений в чугуне, а также определить структуру его металлической основы [5].

Магнитный контроль чугунных отливок основан на различии магнитных свойств структурных составляющих чугуна [6, 7]. Определяющее влияние на магнитные свойства оказывает не содержание, а состояние углерода в чугуне и структура его металлической основы. Исследования влияния формы графитовых включений показали, что чем она компактнее, тем мягче в магнитном отношении чугун. Поэтому ВЧ с шаровидной формой графита имеет меньшую  $H_C$  по сравнению с СЧ той же металлической основы. Но исследования [8] 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 ВЧ по результату измерения  $H_C$  и связанных с ней параметров может быть отбракован от СЧ только при постоянстве структуры металлической основы чугуна.

Целью работы является анализ влияния изменений структуры металлической основы ВЧ при постоянстве формы графитовых включений на коэрцитивно чувствительный магнитный параметр



Рис. 2. Внешний вид отливок из высокопрочного чугуна ВЧ50

и скорость звука; разработка рекомендаций по совместному использованию результатов магнитных и ультразвуковых измерений свойств чугуна для контроля его структуры.

**Особенность исследования** состоит в оценке структуры, измерении магнитного параметра и скорости звука на одном и том же малогабаритном изделии.

Экспериментальные образцы представляли собой (рис. 2) отливки сложной формы, изготавливаемые на одном из литейных заводов из высокопрочного чугуна марки ВЧ50. Определение микроструктуры изделий, отобранных по результатам магнитных и ультразвуковых измерений, выполнено в центральной заводской лаборатории завода по ГОСТ [3]. Для определения микроструктуры образцы разрезали вдоль оси. На полученных плоскостях выполнялись шлифы.

В качестве коэрцитивно чувствительного магнитного параметра образцов использована величина остаточного магнитного потока  $\Phi_0$ , сохраняющаяся в них после намагничивания до состояния, близкого к техническому насыщению. Измерения параметра  $\Phi_0$  проведены анализатором магнитным МАКСИ-Р (рис. 3) [9]. В приборе МАКСИ-Р мак-



Рис. 3. Внешний вид прибора МАКСИ-Р

симальная напряженность намагничивающего поля на оси датчика составляла 37 кА/м. Диапазон измерения остаточного магнитного потока  $\Phi_0$ : 0,01–6,00 мкВб (значению 0,6 мкВб соответствуют показания прибора  $\Phi_0 = 100$ ). Относительная погрешность измерения магнитного потока  $\Phi_0$  не более  $\pm 1,5\%$ . Размеры контролируемых изделий: продольные 10–75 мм; поперечные 5–45 мм. Время контроля одного изделия не более 0,33 с. Прибор обеспечивает разделение деталей на годные и брак по измеренному значению  $\Phi_0$  и подсчет количества проконтролированных и бракованных деталей.

**Методика эксперимента.** Проведено измерение остаточного магнитного потока  $\Phi_0$  310 отливок прибором МАКСИ-Р. Значения  $\Phi_0$  находились в

диапазоне от 0,6 мкВб (показания прибора 100) до 2,96 мкВб (показания прибора 495). Образцы были разделены на шесть групп со значениями  $\Phi_0$ : до 140 (83 шт.); от 140 до 180 (74 шт.); от 180 до 220 (67 шт.); от 220 до 270 (74 шт.); от 270 до 290 (5 шт.); свыше 290 (7 шт.). Из выделенных групп отобраны образцы (33 шт.), у которых измерена скорость  $V$  звука ультразвуковым толщиномером фирмы «Kraut Kramer» и проведен микроструктурный анализ. Результаты этого анализа, значения  $\Phi_0$  и  $V$  в образцах приведены в таблице.

Анализ полученных результатов показал, что у большинства исследованных образцов (№ 1–28) графит имел сферическую форму (пластинчатый графит отсутствовал). Результаты анализа влия-

Показания  $\Phi_0$  прибора МАКСИ-Р и скорость  $V$  звука в отливках по рис. 2 с различной микроструктурой

Номер образца	Номер отливки	Показания $\Phi_0$ МАКСИ-Р, :0,006, мкВб	Микроструктура					Скорость звука $V$ , м/с
			ШГ, %	ВГ, %	ПГ, %	перлит, %	феррит, %	
1	3	231	90	10		60	40	5461
2	3-1	111	90	10		13	87	5412
3	3-2	106	100			6	94	5486
4	3-3	128	100	следы		25	75	5491
5	4-1	156	100			30	70	5546
6	4-2	159	100			38	62	5468
7	4-3	165	100			25	75	5506
8	4-4	170	100			45	55	5546
9	4-5	178	100			45	55	5613
10	4-6	141	100			50	50	5671
11	5-1	188	90	10		45	55	5499
12	5-2	197	100			45	55	5644
13	5-3	200	80	20		45	55	5415
14	5-4	210	100			45	55	5551
15	5-5	215	100			45	55	5693
16	5-6	220	100			50	50	5575
17	6-1	224	70	30		45	55	5495
18	6-2	234	100			45	55	5497
19	6-3	235	100			45	55	5625
20	6-4	245	100			60	40	5594
21	6-5	258	100			70	30	5622
22	6-6	260	100			70	30	5621
23	6-7	268	100			70	30	5684
24	7-1	271	100			70	30	5730
25	7-2	276	100			70	30	5577
26	7-3	279	100			70	30	5479
27	7-4	285	100			70	30	5733
28	7-5	290	100			70	30	5723
29	5	127	40	60		30	70	5040
30	3-4	137	50	50		30	70	5530
31	4	125	50	30	20	30	70	4960
32	2-2	493			100	70-96	+	3707
33	2-3	292	93		7	60	40	4479

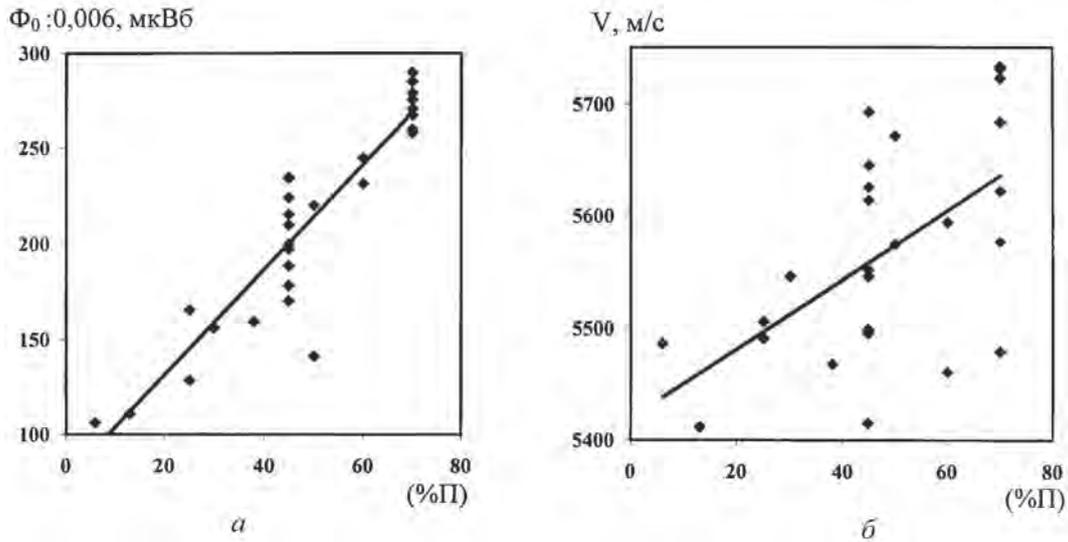


Рис. 4. Зависимость показаний  $\Phi_0$  прибора МАКСИ-Р (а) и скорости звука  $V$  (б) от процентного содержания перлита (%П) в металлической матрице отливок из высокопрочного чугуна

ния процентного содержания перлита (%П) в металлической матрице этих образцов на  $\Phi_0$  и  $V$  приведены на рис. 4. Статистический анализ полученных результатов позволил получить уравнения линейной регрессии для исследованных зависимостей:

$$\Phi_0 \approx 2,764(\%П) + 76,$$

$$V \approx 3,07(\%П) + 5240$$

при коэффициентах  $R$  корреляции соответственно, равных 0,92 и 0,58.

Таким образом, сильная и практически прямо пропорциональная зависимость коэрцитивно чувствительного магнитного параметра  $\Phi_0$  от (%П) в металлической матрице чугуна при постоянной форме графитовых включений, отмеченная в [7, 8], подтверждена полученными результатами. Такая же зависимость, хоть и с меньшим  $R$ , проявилась и для скорости звука  $V$  в чугуне. Это соответствует данным о большей скорости звука в чугуне, имеющем более высокие механические свойства при постоянной форме графитовых включений [4]. Отметим, что и  $\Phi_0$ , и  $V$  с увеличением (%П) возрастают. Следствием этого является (рис. 5) прямо пропорциональная зависимость между  $\Phi_0$  и  $V$  при постоянной форме графитовых включений в чугуне:

$$V \approx 0,92 \Phi_0 + 5376$$

при  $R \approx 0,52$ .

Между тем, анализ результатов (см. таблицу) измерения  $\Phi_0$  и  $V$  в отливках, содержащих пластинчатый графит (ПГ), показал, что по мере возрастания процентного содержания ПГ в чугуне при постоянном содержании (%П) в металлической матрице чугуна  $\Phi_0$  в отливках возрастает,

а  $V$  снижается, т. е. имеет место обратная зависимость между  $\Phi_0$  и  $V$ . Это создает предпосылки для определения как формы включений в чугуне, так и (%П) в металлической матрице чугуна по совокупности результатов измерения  $\Phi_0$  и  $V$  (как результат решения системы двух линейно независимых уравнений с двумя неизвестными).

Реализации такой возможности в полном объеме помешала невозможность измерения скорости звука  $V$  бесконтактно в процессе движения отливок, как это реализовано в приборе МАКСИ-Р при измерении параметра  $\Phi_0$ .

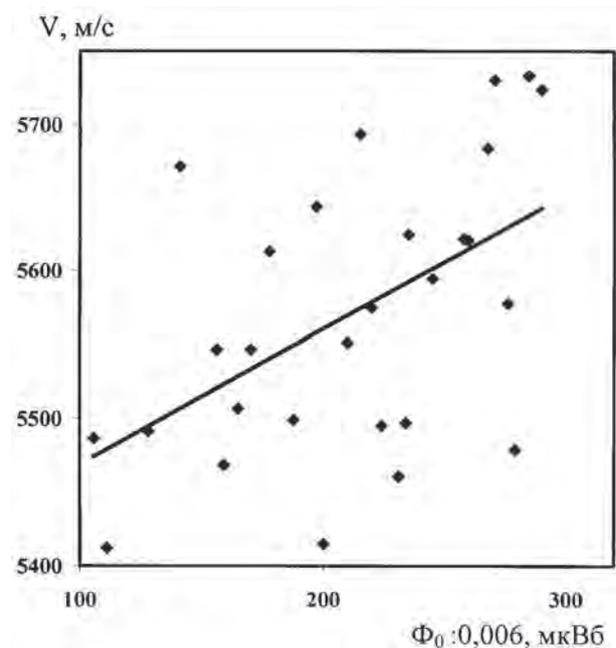


Рис. 5. Взаимосвязь между показаниями  $\Phi_0$  прибора МАКСИ-Р и скоростью звука  $V$  в отливках из высокопрочного чугуна с различным содержанием перлита

Между тем, при анализе технологии производства отливок было установлено, что, как и в [8], в большинстве случаев появление пластинчатого графита в отливке сопровождалось увеличением содержания перлита в ее металлической матрице. Поэтому было предложено в дополнение к выборочной проверке нескольких отливок из партии по скорости звука проводить 100%-ный контроль магнитным методом по результату измерения  $\Phi_0$  партий отливок, в которых  $V$  выходила за установленные пределы. Для проверки эффективности такой методики браковочный порог установлен  $\Phi_0 = 285$  (1,71 мкВб).

Проведена опытная разбраковка партии в 1100 отливок. Прибором МАКСИ-Р автоматически отбраковано 26 отливок. При перепроверке отбракованных отливок ультразвуковым методом брак (наличие пластинчатого графита) подтвержден у 19 отливок. Для семи отливок брак не подтвержден. Перебраковка составила 0,64% от числа проверенных отливок. Выборочная проверка годных отли-

вок по скорости звука не выявила дефектных отливок. Результаты опытной автоматической разбраковки отливок прибором МАКСИ-Р признаны удовлетворительными.

### Выводы

1. Статистическим анализом результатов измерения остаточного магнитного потока  $\Phi_0$  и скорости  $V$  звука в 28 отливках из чугуна с шаровидным графитом с различным процентным содержанием перлита (%П) в металлической матрице установлено, что увеличение (%П) приводит к увеличению и  $\Phi_0$  (линейное уравнение регрессии с коэффициентом корреляции  $R \approx 0,92$ ), и  $V$  (линейное уравнение регрессии с  $R \approx 0,58$ ).

2. Появление пластинчатого графита при постоянном (%П) приводит к увеличению  $\Phi_0$  и уменьшению  $V$ . Это создает предпосылки для определения как формы включений в чугуне, так и (%П) в металлической матрице чугуна по совокупности результатов измерения  $\Phi_0$  и  $V$ .

### Литература

1. Горшков А. А. О механизме образования шаровидного графита // Литейное производство. 1955. № 3. С. 17–21.
2. Бубликов В. Б. Высокопрочному чугуна – 60\* (обзор) // Литейное производство. 2008. № 11. С. 2–8.
3. ГОСТ 3443-87. Методы определения структуры. М.: Изд-во стандартов, 1990.
4. Воронкова Л. В. Контроль чугунных отливок ультразвуком. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
5. Баев А. Р., Коновалов Г. Е., Майоров А. Л. и др. Методы выявления несплошностей и контроль структуры чугунов с использованием объемных и головных волн // Литье и металлургия. 2004. № 4. С. 95–100.
6. Горкунов Э. С., Сомова В. М., Ниципурек А. П. Магнитные свойства и методы контроля структуры и прочностных характеристик чугунных изделий. (Обзор) // Дефектоскопия. 1994. № 10. С. 54–82.
7. Сандомирский С. Г. Возможности и ограничения магнитного контроля структуры чугунных отливок (обзор) // Литье и металлургия. 2006. № 2(38). Ч. 1. С. 118–123.
8. Сандомирский С. Г., Цукерман В. Л., Писаренко Л. З. Анализ предпосылок количественного контроля структуры изделий из высокопрочного чугуна магнитным методом // Литье и металлургия. 2005. № 2(34). Ч. 2. С. 143–148.
9. Сандомирский С. Г., Цукерман В. Л. Новые автоматизированные средства магнитного и электромагнитного контроля физико-механических свойств изделий массового производства // Материалы XVII Рос. науч.-техн. конф. «Не разрушающий контроль и диагностика» (Электронный ресурс). Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН. 5–11 сентября 2005 г.