



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-

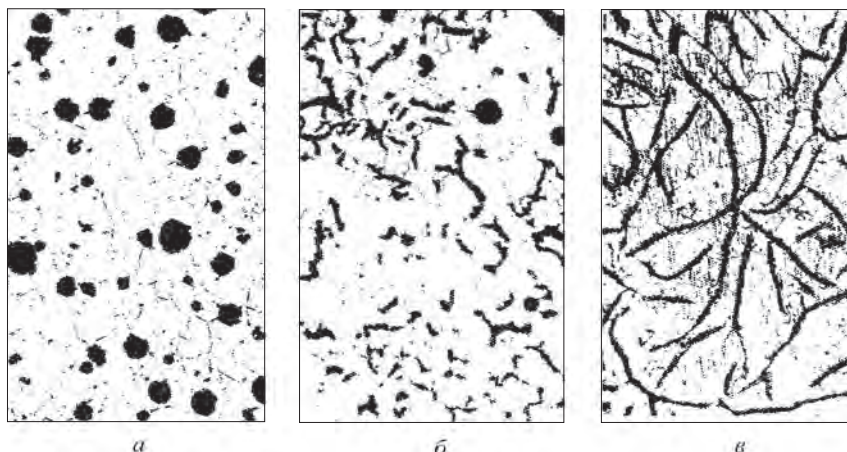


Рис. 1. Микроструктура высокопрочного (а), вермикулярного (б) и серого (в) чугунов по [4]. $\times 100$

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 чугуновых 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 чугуновых 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 Φ_0 , сохраняющаяся в них после намагничивания до состояния, близкого к техническому насыщению. Измерения параметра Φ_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 Φ_0 : 0,01–6,00 мкВб (значению 0,6 мкВб соответствуют показания прибора $\Phi_0 = 100$). Относительная погрешность измерения магнитного потока Φ_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 Φ_0 и подсчет количества проконтролированных и бракованных деталей.

Методика эксперимента. Проведено измерение остаточного магнитного потока Φ_0 310 отливок прибором МАКСИ-Р. Значения Φ_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 Φ_0 : до 140 (83 шт.); от 140 до 180 (74шт.); 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 Φ_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 Φ_0 прибора МАКСИ-Р и скорость V звука в отливках по рис. 2 с различной микроструктурой

| Номер образца | Номер отливки | Показания Φ_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 |

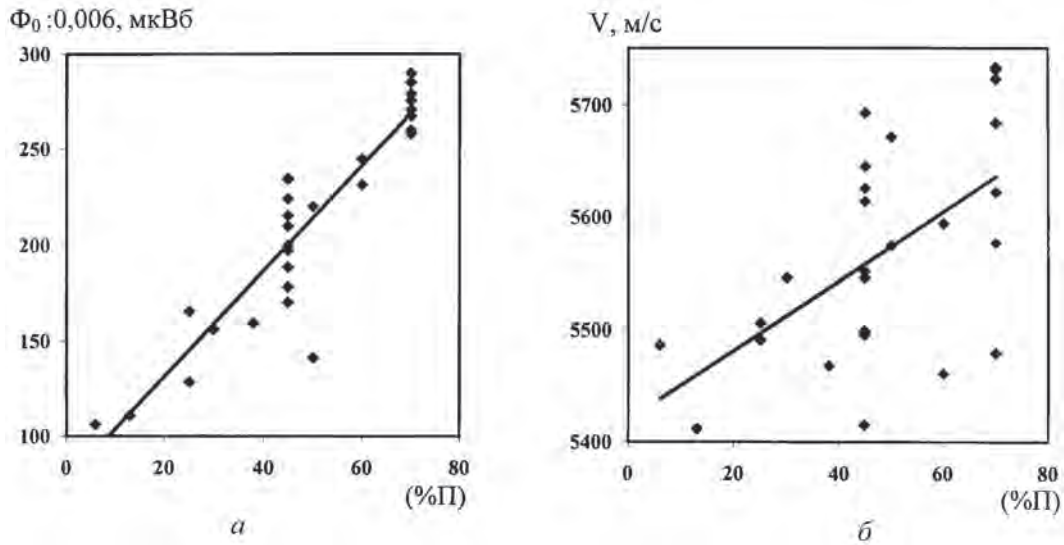


Рис. 4. Зависимость показаний Φ_0 прибора МАКСИ-Р (а) и скорости звука V (б) от процентного содержания перлита (%П) в металлической матрице отливок из высокопрочного чугуна

ния процентного содержания перлита (%П) в металлической матрице этих образцов на Φ_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 Φ_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 Φ_0 , и V с увеличением (%П) возрастают. Следствием этого является (рис. 5) прямо пропорциональная зависимость между Φ_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 Φ_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 Φ_0 в отливках возрастает,

а V снижается, т. е. имеет место обратная зависимость между Φ_0 и V . Это создает предпосылки для определения как формы включений в чугуне, так и (%П) в металлической матрице чугуна по совокупности результатов измерения Φ_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 Φ_0 .

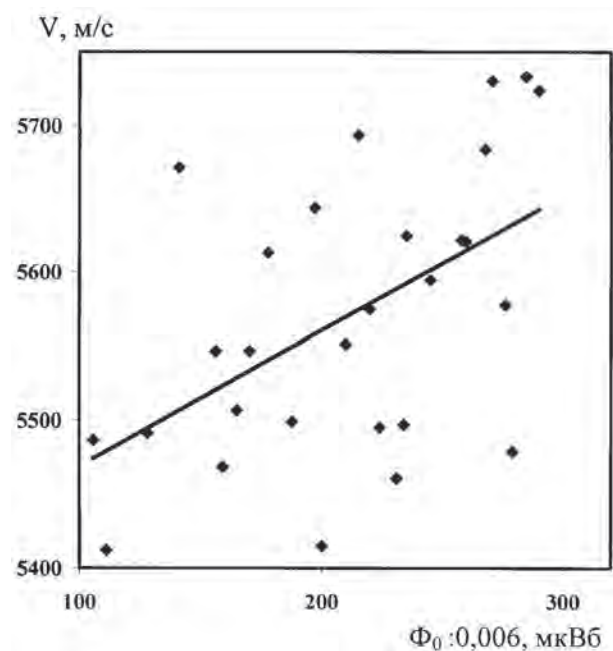


Рис. 5. Взаимосвязь между показаниями Φ_0 прибора МАКСИ-Р и скоростью звука V в отливках из высокопрочного чугуна с различным содержанием перлита

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 Φ_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 отливок

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 Φ_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 Φ_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 Φ_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 Φ_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., Ничипурук 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. «Неразрушающий контроль и диагностика» (Электронный ресурс). Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН. 5–11 сентября 2005 г.