



The correlation dependence between hardness of castings of high-duty cast irons and grey irons, contents of pearlite in metallic mould of high-duty cast iron and parameters CrH of remanent magnetic induction field over surface of castings after magnetization with constant magnet, is determined and analyzed.

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

УДК 620.179.14

ВОЗМОЖНОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ ПОСЛЕ ПОЛЮСНОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ

Чугун — один из наиболее используемых технологических материалов. Преимуществами чугуна являются [1] относительно простой и дешевый процесс получения отливок сложной формы и хорошая их обрабатываемость резанием, высокая пластичность (для ковкого и высокопрочного чугунов), прочность, износостойкость, коррозионная стойкость. В тех случаях, когда отливка механически обрабатывается дорогостоящим инструментом или в процессе эксплуатации подвергается контактными нагрузкам, важным параметром наряду с прочностью является твердость отливки. В зависимости от структуры металлической матрицы, формы графитовых включений и режима термической обработки твердость отливок может изменяться в весьма широких пределах. Так, по данным [2], твердость серого чугуна (СЧ) может изменяться в пределах 160–270 ед. НВ, ковкого — 149–270 ед. НВ, высокопрочного (ВЧ) — 130–300 ед. НВ, а белого — 300–700 ед. НВ. Предварительная сортировка отливок на группы твердости позволяет выбрать оптимальные режимы механической обработки, повысить ее качество и сократить расход обрабатывающего инструмента. Твердость отливки однако служит параметром, измерение которого не всегда возможно без ущерба для потребительских свойств отливки, зачастую требует ее разрушения или изготовления образцов-свидетелей. Стандартные методы определения твердости отливки [3] трудоемки, не производительны, требуют подготовки (зачистки, шлифовки) контролируемой поверхности и в связи с этим практически не применимы для контроля в промышленных условиях отливок массового производства. Такой контроль может быть осуществлен только неразрушающим методом, наиболее перспективным из которых является магнитный.

Магнитный контроль чугунных отливок основан на различии магнитных свойств (прежде всего коэрцитивной силы H_c [2, 4–6]) чугунов с разной структурой. Одним из методов контроля свойств изделий, прогнозирования обрабатываемости и изменения свойств материала со временем по результатам косвенного определения H_c является метод «точечного полюса» [7]. Опыт его использования выявил оптимальный для измерения параметр поля остаточной намагниченности — градиент ∇H нормальной составляющей поля над местом контакта с полюсом постоянного магнита. Современный уровень развития средств магнитного контроля структуры изделий [7, 8] обеспечивает их использование непосредственно в цехах промышленных предприятий. Актуальна задача определения количественной взаимосвязи магнитных параметров чугунных отливок, измеряемых неразрушающим методом, с характеристиками структуры чугунов и их твердостью.

Цель работы — уточнение взаимосвязи структурных параметров чугунных отливок, определенных по [9], твердости НВ отливок и информационного параметра прибора неразрушающего контроля МС [8], сигнал которого пропорционален H_c материала изделия. Особенностью исследования является измерение всех параметров в одной области отливки.

Внешний вид прибора МС показан на рис. 1. Прибор предназначен [8] для сортировки ферромагнитных материалов по маркам, контроля структурных неоднородностей чугуна. Непосредственно измеряемый прибором параметр GrH — градиент ∇H ($GrH = \nabla H \cdot 10^{-2}$, А/м²) нормальной составляющей поля остаточной намагниченности (в диапазоне 0,2–150 кА/м²) над поверхностью контролируемого объекта после его намагничивания мето-



Рис. 1. Внешний вид магнитного сортировщика МС

дом точечного полюса постоянным магнитом из магнитотвердого материала. Размеры магнита и зонда градиентомера обеспечивают практически

линейную связь показаний GrH прибора с H_c материала отливки [10].

В качестве образцов для исследования использованы [11] ступицы из ВЧ50, предварительно отобранные из промышленной партии изделий по показаниям прибора МС. По результатам измерения было отобрано десять образцов, имеющих показания GrH во всем диапазоне их изменения. Отобранные образцы были разрезаны в экваториальной плоскости и на полученных шлифах (площадки размером около 45x22 мм) определена их микроструктура в соответствии с [9]. После этого на поверхности шлифов размагниченных образцов прибором МС были измерены значения GrH после намагничивания отливки методом точечного полюса и твердость НВ. Результаты измерения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты измерения микроструктуры, твердости НВ и магнитного параметра GrH , измеренного прибором МС, на образцах ступиц из высокопрочного чугуна

Номер образца	Характеристика структуры по ГОСТ 3443-87		Твердость НВ	Показания МС, GrH
	Форма и размеры графитовых включений по [3]	Содержание перлита, %		
1	ШГд 15, 25, 45	0	143	44
2	ШГд 25	0	156	48
3	ШГд 25 - 45	20	149	78
4	ШГд 25 - 45	30	197	86
5	ШГ + 10% вермикулярного	70	229	92
6	ШГр4, ШГф3	70	217	118
7	ШГд 45, ШГ10, ШГф5	70	207	126
8	ШГд 45, ШГ10, ШГф5	70	223	126
9	ШГд 45, ШГ10, ШГф5	45	187	162
10	ШГд 25	92	255	197

Проведенные металлографические исследования подтвердили, что микроструктура образцов соответствует микроструктуре ВЧ, а содержание перлита в металлической матрице образцов охватывает практически весь возможный диапазон его изменения. Твердость НВ образцов и результаты измерения на их поверхности магнитного параметра GrH также изменялись в широких пределах, что явилось предпосылкой возможности количественного анализа взаимосвязи этих параметров.

Анализируемые зависимости приведены на рис. 2.

Статистическая обработка результатов измерения позволила получить для анализируемых зависимостей следующие уравнения линейной регрессии:

$$HB = 1,07 (\% \text{ перлита}) + 144,8, \quad (1)$$

коэффициент корреляции $R = 0,92$,

$$GrH = 0,98 HB - 84,7, \quad (2)$$

коэффициент корреляции $R = 0,76$,

$$GrH = 1,13 (\% \text{ перлита}) + 53,3, \quad (3)$$

коэффициент корреляции $R = 0,75$.

Высокое значение R зависимости между GrH и %-ным содержанием перлита в металлической матрице образцов подтверждает сделанный ранее [12] вывод о возможности количественной оценки структуры отливок из ВЧ по результату измерения магнитного параметра, косвенно связанного с H_c материала отливки. Отметим, что изменение содержания перлита в металлической матрице ВЧ от 0 до 100%, согласно (3), изменяет GrH в 3,1 раза, что близко к оценкам [12], по которым это изменение в отливках из ВЧ и СЧ составляло 2,8 раза.

Результаты проведенной статистической обработки анализируемых зависимостей показывают, что твердость НВ отливок практически полностью определяется %-ным содержанием в них перлита. Это соответствует представлениям [5, 6, 13] о влиянии %-ного содержания перлита в чугунах на их твердость, но наличие столь высокого R в линейном уравнении регрессии между этими параметрами для отливок из ВЧ представляет интерес и определенную новизну.

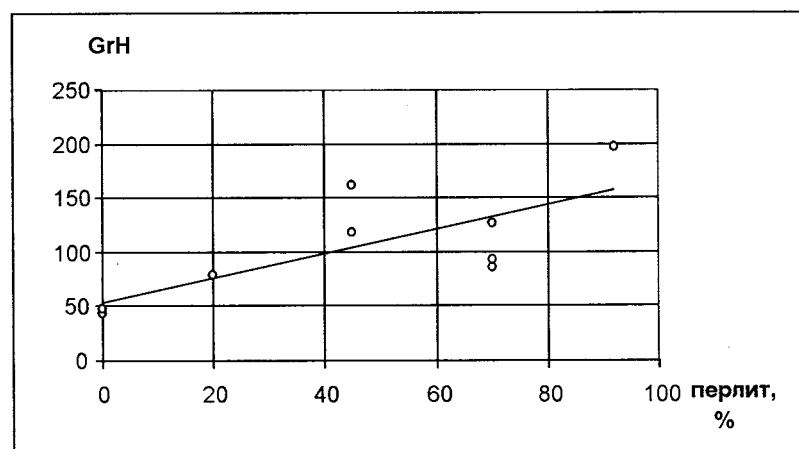
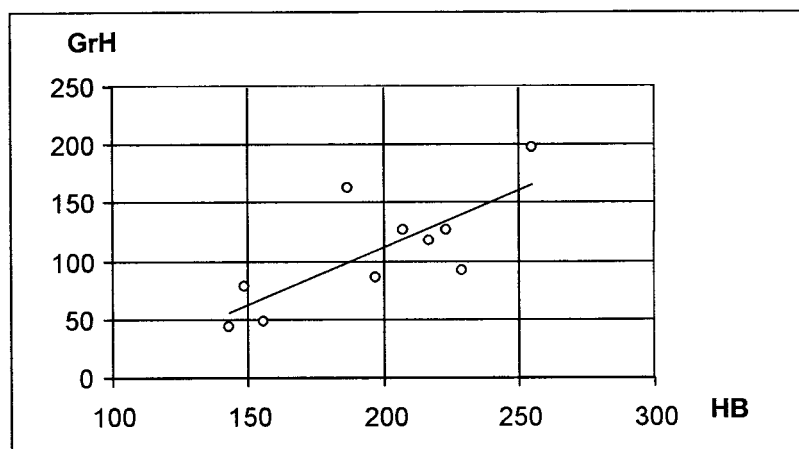
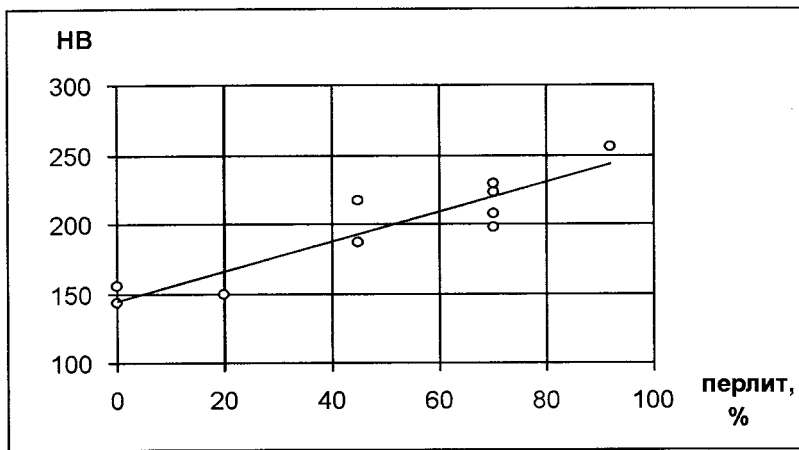


Рис. 2. Взаимосвязь между твердостью НВ и %-ным содержанием перлита в отливках из высокопрочного чугуна (а) и зависимости показаний *GrH* прибора МС от твердости НВ (б) и %-ного содержания перлита (в) в отливках со структурой высокопрочного чугуна

Хотя *R* в зависимости между *GrH* и твердостью НВ отливок несколько меньше, его высокое значение создает хорошие предпосылки для сортировки отливок из ВЧ по твердости магнитным методом. Отметим, что решение этой задачи ультразвуковым методом, по-видимому, невозможно, так как скорость ультразвука коррелирует с формой графитовых включений в ВЧ (соотношением между количеством графитовых включений шаро-

видной и пластинчатой форм) [14], но не с содержанием перлита в его металлической матрице.

Из уравнений (2) и (3) можно предложить уравнения для оценки твердости отливок из ВЧ и содержания перлита в них по показаниям *GrH* прибора МС:

$$HV = 1,02GrH + 86,4, \quad (2')$$

$$\% \text{ перлита} = 0,89GrH - 47,3. \quad (3')$$

По-видимому, в случаях, когда определяющее влияние на свойства отливки оказывает структура металлической матрицы чугуна, следует ожидать наличия корреляционной зависимости между твердостью отливки и ее коэрцитивным параметром. Об этом свидетельствуют и результаты исследования по выявлению заготовок повышенной твердости среди цилиндров из СЧ18, проведенные с использованием прибора МС на заводе "Автоагрегат" (г. Кинешма).

Внешний вид отливок показан на рис. 3. Измерения проводили в местах (на поверхностях 1–4), где повышенная твердость встречается наиболее часто (диаметр площадки в месте контроля около 20 мм, толщина – 8 мм) в следующей последовательности: в состоянии поставки на поверхностях 1–4 – прибором МС, затем поверхности 1–4 подвергали зачистке, размагничивали и на них вновь проводили измерения прибором МС. После этого измеряли твердость НВ.

На рис. 4, а, б представлена зависимость показаний *GrH* прибора МС от твердости НВ отливок до и после зачистки мест контроля. По результатам статистической обработки экспериментальных данных получены следующие уравнения линейной регрессии:

$$GrH = 2,18 HV - 30,3, \quad (4)$$

$$GrH = 2,43 HV - 85,1. \quad (5)$$

Коэффициент корреляции *R* в первом случае составил 0,84, во втором – 0,88.

Различие *R* может быть связано с возможным наличием обезуглероженного слоя, свойства которого могут отличаться от свойств сердцевинки. Заданному браковочному порогу по твердости (200 ед. НВ) соответствует порог в 400 ед. показаний *GrH* прибора МС.

При обследовании партии из 100 заготовок установлено, что 30 из них имеют *GrH*, соответствующие твердости, превышающей 200 ед. НВ.

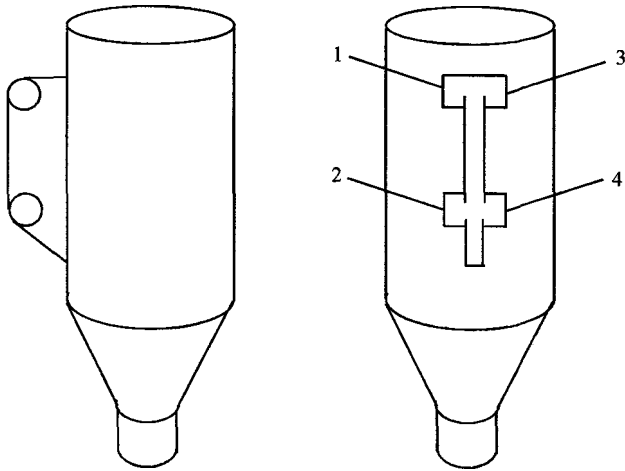
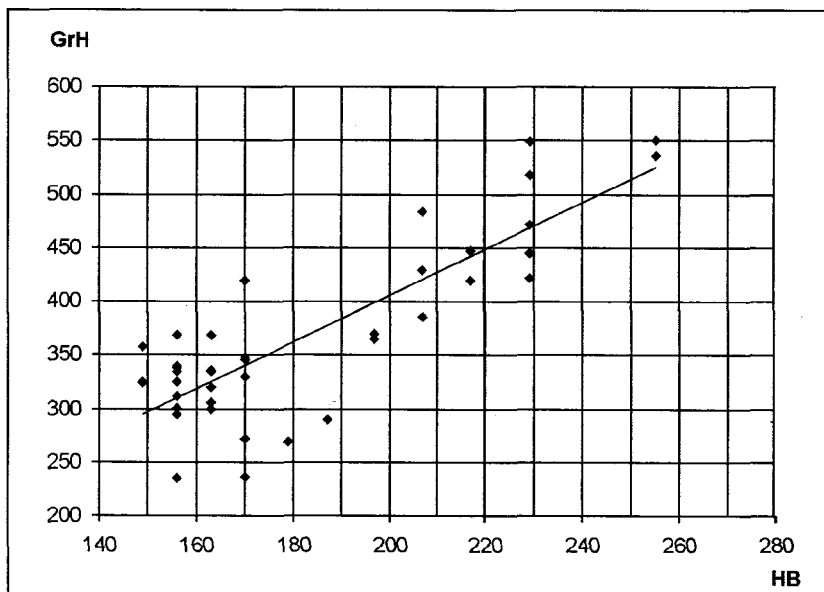


Рис. 3. Внешний вид заготовок цилиндров из серого чугуна СЧ18: 1-4 – участки измерения твердости и показаний прибора МС

При этом оказалось, что твердость в пределах одной заготовки (места 1-4, рис. 3) может существенно различаться и находиться по разные стороны браковочного предела. Это подтверждено непосредственным измерением НВ.

Представляет интерес сопоставить показания прибора МС, полученные на образцах одинаковой твердости, но имеющих различную (шаровидную и пластинчатую) форму графитовых включений. Результаты такого виртуального эксперимента, полученные с использованием уравнений (2) и (5), приведены в табл. 2.

Из таблицы видно, что при одинаковой твердости отливок значения GrH на отливках с пластинчатой формой графитовых включений (СЧ) в 3,26-4,28 раза выше, чем на отливках с шаровидной формой графитовых включений (ВЧ).



а

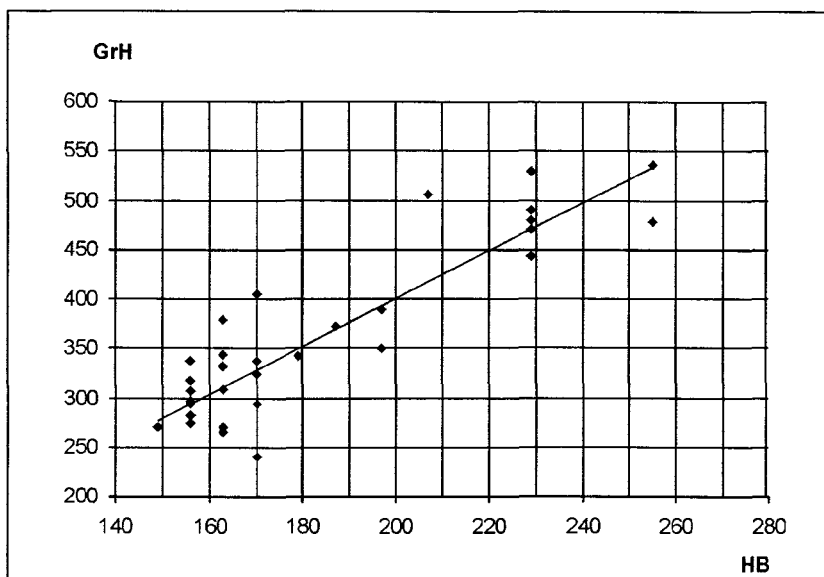


Таблица 2. Показания *GrH* прибора МС при контроле отливок одинаковой твердости НВ из высокопрочного (ВЧ) и серого (СЧ) чугунов. Расчет по формулам (2) и (5)

Твердость НВ	Показания МС, <i>GrH</i>		$\frac{GrH(СЧ)}{GrH(ВЧ)}$
	ВЧ	СЧ	
150	62	279	4,48
200	111	401	3,60
250	160	522	3,26

Такая большая разница, кроме известного [2, 12] увеличения H_c отливок с пластинчатой формой графита, находит объяснение в разных условиях эксперимента (меньший диаметр и толщина металла в месте измерения *GrH*). Изменение твердости от 150 до 250 ед. НВ изменяет измеряемый прибором МС параметр *GrH* в 2,57 раза для ВЧ и в 1,87 раза для СЧ. Это является хорошей предпосылкой как для контроля твердости чугунных отливок с известной формой графитовых включений по результатам измерения магнитного параметра, так и для определения неизвестной структуры отливки по результатам измерения ее магнитного параметра и твердости.

Выводы

1. Экспериментальным исследованием взаимосвязи микроструктуры (по ГОСТ 3443-87) отливок ступиц из ВЧ50 с их твердостью НВ и показаниями коэрцитивно чувствительного прибора неразрушающего контроля МС установлено, что:

- твердость НВ отливок практически определяется %-ным содержанием в них перлита, коэффициент корреляции линейного уравнения регрессии между этими параметрами близок к 0,92;
 - при одинаковой форме графитовых включений изменение содержания перлита в металлической матрице отливок из ВЧ от 0 до 100% повышает коэрцитивно чувствительный параметр *GrH*, измеряемый прибором МС, в 3,1 раза.
 - высокие значения (свыше 0,75) коэффициентов корреляции зависимостей между показаниями *GrH* прибора МС, твердостью отливок и содержанием перлита в структуре их металлической матрицы создают хорошие предпосылки для определения структуры и твердости отливок по показаниям прибора в соответствии с полученными уравнениями линейной регрессии (2') и (3').
2. Получены высокие (свыше 0,84) значения коэффициентов корреляции в уравнениях (4) и (5) линейной регрессии между показаниями *GrH*

прибора МС и твердостью НВ отливок цилиндров из СЧ18 до и после зачистки поверхности участков измерения.

Литература

1. Бунин К.П., Таран Ю.Н. Строение чугуна. М.: Металлургия, 1972.
2. 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.
3. Авдеев Б.А. Техника определения механических свойств металлов. М., 1965.
4. Карамара А. Основные положения магнитных методов контроля состояния и качества чугунных отливок // 25-й Международный конгресс литейщиков. М., 1961.
5. Русин П. И., Гофман Л. А., Капустянский М.А. Магнитная структуроскопия термически обработанного чугуна. Ростов-на-Дону, 1978.
6. Сандомирский С.Г. Возможности и ограничения магнитного контроля структуры чугунных отливок (обзор) // Литье и металлургия. 2006. № 2(38). Ч.1. С. 118–123.
7. Сандомирский С.Г. Применение полюсного намагничивания в магнитном структурном анализе (обзор) // Дефектоскопия. 2006. № 9. С. 36–64.
8. Сандомирский С.Г., Цукерман В.Л., Линник И.И., Сандомирская Е. Г. Универсальный магнитный сортировщик и его применение для решения задач неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2004. № 8. С. 27–31.
9. ГОСТ 3443-87. Методы определения структуры.
10. Сандомирский С.Г. Влияние длины феррозондовых датчиков на их чувствительность к свойствам полюсно намагниченных изделий с плоской поверхностью // Материалы III Рос. науч.-техн. конф. «Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций». Екатеринбург, 2007.
11. Сандомирский С.Г., Цукерман В.Л., Писаренко Л.З. Исследование взаимосвязи структуры, твердости и магнитных свойств отливок из высокопрочного чугуна // Там же.
12. 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. Ч. 2. С. 143–148.
13. Ивлев В.И. Контроль структуры металлической основы и формы графита в отливках коленчатых валов из высокопрочного чугуна магнитным методом // Дефектоскопия. 1965. № 6. С. 27–30.
14. Воронкова Л.П. Ультразвуковой контроль чугуна. М., 1996.