

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЧУГУНА МЕТОДОМ ЭФФЕКТА БАРКГАУЗЕНА

Non Destructive Testing of Cast Iron Parts Using Barkhausen Effect

Бусько В.Н., Венгринович В.Л., Чепыжов Б.А.
Busko V.N., Vengrinovich V.L., Tchepyjov B.A.

Рассматриваются традиционные методы оценки микроструктуры при производстве изделий из литого чугуна на основе металлографии и ультразвука в сопоставлении с новым методом, основанном на магнитном методе эффекта Баркгаузена. Исследуется чувствительность метода к содержанию шаровидного графита и металлической матрицы. Металлографический и ультразвуковой методы использовались в качестве эталонных методов. Использовалась упрощенная версия магнитошумового анализатора, измеряющая уровень магнитного шума в изделиях сложной формы с необработанной поверхностью при одностороннем доступе. Показана высокая эффективность метода и аппаратуры при контроле степени графитизации и металлической основы изделий из высокопрочного чугуна, основанная на удобстве при эксплуатации в условиях массового производства и невысокой стоимости.

As traditional metallographic and ultrasonic evaluation of cast iron microstructure in mass manufacturing of machine articles has many disadvantages, the new technique based on Barkhausen Effect is proposed and investigated as to its sensitivity to the content of the globular graphite in ferrite and cementite matrixes respectively. Both metallographic and ultrasonic techniques were used as the reference methods. A simplified type Barkhausen noise analyzer IMSH was used to evaluate microstructure in articles with different shapes, rough non machined surface, all with one side access to the surface. The high sensitivity of the new technique to the critical components content in the high strength cast iron together with its efficient production, usability and low cost are demonstrated.

Введение и постановка задачи.

Проблема неразрушающего контроля качества изделий из чугуна в настоящее время относится к приоритетным прикладным задачам. Это обусловлено ростом потребления чугуна в промышлен-

ности и требований к качеству изготавливаемых изделий. Значительная часть продукции фасонного литья приходится на высокопрочные чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом, используемым в промышленности для изготовления ответственных изделий сложных форм и конфигураций [1-2]. Для идентификации структуры, а также вида, формы, размера, количества и распределения графитовых включений в фасонных изделиях из чугуна до сих пор превалирует в качестве экспертного разрушающий метод металлографического анализа, ГОСТ 3443-87 [4].

Из методов неразрушающего контроля (НК) наибольшее применение получил магнитный метод [4-7], главным образом, по изменению коэрцитивной силы. Изменение формы графитовых включений приводит к изменению магнитной жесткости чугуна, в результате чего коэрцитивная сила изменяется в пределах, доступных для надежной регистрации с помощью либо приставных электромагнитов [6], либо специально сконструированных катушек [5,7], измеряющих коэрцитивную силу небольших по размерам изделий целиком, естественно, в среднем. Все более широкое применение для контроля отливок получает ультразвуковой метод [8-10]. Влияние формы графитовых включений отражается на модуле упругости чугуна, а, следовательно, на скорости и затухании продольных ультразвуковых (УЗ) волн, изменение которых оценивается с помощью измерения параметров УЗ сигнала при его прохождении через изделие (time of flight), как при двухстороннем, так и при одностороннем доступе. Как правило, скорость ультразвука увеличивается с увеличением отношения содержания шаровидных графитных включений к общему содержанию графита. Кроме этого, скорость УЗ увеличивается также при уменьшении общего количества графита, размеров графитовых включений, изменении их формы от пластинчатой к шаровидной, увеличении содержания цементита в основе [11]. Информацию о графите получают по скорости УЗ, а о металлической основе – по его затуханию. Недостатки метода заключаются в необходимости дробеструйной обработки контролируемой поверхности изделий после ли-

тъя в земляные формы, других видов подготовки поверхности, а также в сильной зависимости показаний от размеров шаровидных включений. Для осуществления контроля с его помощью необходимы снятие окалины с грубой поверхности отливок, нанесение контактной смазки, установка двух ультразвуковых преобразователей на противоположных сторонах отливки, что, в итоге, снижает производительность контроля [8-9]. Среди других методов контроля чугуна следует отметить электромагнитный и магнитоупругоакустический [3,10]. Таким образом, в области НК чугуна выполнено большое количество исследований [4,5], однако спрос на конкурентоспособные методы контроля по-прежнему достаточно острый. Низкая стоимость, локальность, возможность контроля в труднодоступных участках изделий, возможность подавления влияющих факторов, количественная оценка содержания отдельных составляющих структуры – вот неполный перечень требований к новым разработкам в этой области.

Методика исследований.

В работе предлагается использовать метод эффекта Баркгаузена (МЭБ), имеющего ряд преимуществ. Информативные параметры МЭБ обладают высокой чувствительностью к микро концентраторам напряжений и любым изменениям структуры ферромагнетика. Как правило, не требуется специальная подготовка поверхности, а аппаратная реализация метода обеспечивает получение локальной информации, преимущественно, с поверхностных слоев ферромагнитного изделия [12-14].

Исследования возможности применения МЭБ для контроля чугуна проводились в Институте прикладной физики НАН Беларуси и литейном цехе РУПП «МАЗ» с помощью разработанного нами прибора ИМШ (индикатор магнитного шума) с накладным преобразователем Баркгаузена (ПБ) (рис. 1) [15-16], основные технические характеристики которого приведены в таблице 1.

Принцип действия прибора ИМШ основан на локальном намагничивании участка поверхности ферромагнитного образца перемен-

ным магнитным полем и регистрации этим же преобразователем скачкообразного изменения его намагниченности. Поступающий затем в электронный блок прибора сигнал усиливается, специальным образом обрабатывается, анализируется и регистрируется. Прибор комплектуется как сетевым адаптером напряжением 220 В частотой 50 Гц, так и аккумуляторным блоком питания, позволяющим осуществлять питание прибора напряжением 12 В в течение длительного времени. Отличительными особенностями прибора являются также высокая производительность контроля, простота обслуживания, невысокая стоимость и малые габариты, что в совокупности делает возможным его использование в литейных цехах, на складах готовой продукции, и др.



Рис. 1. Прибор ИМШ с накладным преобразователем

Табл. 1. Основные технические характеристики прибора ИМШ.

Характеристика	Диапазон
Частота перемагничивания, Гц	64, 128
Амплитуда тока перемагничивания в ПБ, мА	Ступенчато: 20; 50; 70; 90; 120; 150; 200 (при 128 Гц) 30; 70; 90; 120; 170; 210 (64 Гц)
Частота анализа МШ, кГц	10-500
Габариты, мм	200x200x65
Масса, кг (без преобразователя)	1,4
Питание, В	220, частота 50 Гц
Аккумулятор, 12 В	Есть

В качестве сопоставительных методов определения структуры изделий из чугуна, использовались метод металлографического анализа и ультразвуковой метод индикации структуры отливок прибором типа ИЧ, используемым на ряде предприятий [8].

На первом этапе исследования проводились на образцах, на которых с помощью МЭБ измерялась интенсивность магнитного шума, которая затем сопоставлялась с данными металлографического анализа и твердометрии, полученными на образцах, вырезанных в местах измерений. С помощью металлографического анализа в лабораториях

РУПП «МАЗ» определялись наличие и количество шаровидного, вермикулярного или пластинчатого графита, формы, распределения и размеры графитовых включений, а также состав металлической основы. Исследование широкого набора параметров микроструктуры и степени графитизации позволило судить о селективности метода магнитных шумов в условиях одновременного изменения содержания влияющих компонентов микроструктуры чугунов.

На втором этапе исследования выполнялись непосредственно на большой номенклатуре чугунных изделий МАЗ, а результаты измерений магнитного шума сопоставлялись с данными ультразвуковых измерений. Такой подход позволил, во-первых, получить большой статистический материал, и, во-вторых, максимально приблизить задачу НК непосредственно к производственному процессу. В отличие от исследования методом УЗК, поверхности изделий перед измерениями МЭБ не подготавливались за исключением обычной после литья дробеструйной очистки.

Результаты исследований и их обсуждение.

Результаты металлографического анализа и показания прибора ИМШ на чугунных образцах с различным содержанием шаровидного графита приведены в таблице 2.

Из табл. 2 следует, что в показаниях ИМШ можно выделить две группы: низкие значения интенсивности магнитного шума (МШ) – образцы 1,2 и высокие – 3-5. Основное их отличие состоит в том, что образцы 1 и 2 содержат пластинчатый графит, а 3-5 – шаровидный. Видно также, что процентное содержание в исследуемых элементах изделия в матрице преимущественно феррита или перлита не влияет существенно на результаты измерения магнитного шума. Дальнейшие исследования были расширены за счет дополнительного измерения на большей номенклатуре образцов микротвердости, которая часто оказывает решающее влияние на результаты измерения МШ, результаты представлены в таблице 3.

Табл. 2. Результаты металлографического анализа и микромагнитных измерений на образцах, вырезанных из различных мест одной детали (кронштейна)

№ исследуемого образца и зона контроля	Среднее значение показаний прибора ИМШ, мВ	Микроструктура по ГОСТ 3443-87
1-борт	23,6	<u>ПГф2-ПГф1-ПГр3-ПГр7-ПГд45-ПГд90+участок (50%ВГф2-ВГр2+50%ШГф4-ШГд45)-П20(Ф80)-Пт1</u>
2-лапа	35,9	<u>ПГф2-ПГф1-ПГр3-ПГр7-ПГд45-ПГд90+участок (70% ВГф2-ВГр2+30%ШГф4-ШГд45)-П20(Ф80)-Пт1</u>
3 –лапа	119,2	ШГ ф4 – Шгр1-ШГд45-П6(Ф94)-Пт1; участки: <u>ПГф1-ПГф2-ПГр3-ПГд180-П92(Ф8)-Пт1</u>
4-лапа	151,0	(50 %ВГф3-ВГр2+50%ШГф4-ШГд45)1 + участки <u>ПГф2-ПГф1-ПГр3-ПГд90-П20(Ф80)-Пт1</u>
5-лапа	135,3	ШГф4-ШГр1-ШГд45-П20(Ф80)-Пт1 участки: <u>ПГф1-ПГф2-ПГр3-ПГд180-П20(Ф80)-Пт1</u>

Здесь и далее приняты обозначения согласно ГОСТ РФ 3443-87: ШГ– шаровидный графит; ПГ– пластинчатый графит; ВГ– вермикулярный графит; П – перлит; Ф – феррит, Ц – цементит, цифра – процентное содержание соответственно; приставка Гд и цифра – средний размер включений графита в мкм; приставка Гф и цифра – форма включений графита от 1 до 4 (см. ГОСТ); приставка Гр и цифра – распределение включений графита (см. ГОСТ); Пт1 и Пт2 – соответственно пластинчатый и зернистый перлит; приставка Г и цифра – значение средней площади, занятой графитом на микрошлифе.

Из анализа данных металлографического анализа вытекает важный вывод о том, что, в пределах одного участка может наблюдаться неоднородность по виду, форме и размерам включений графита (об этом свидетельствуют и полученные с помощью МЭБ данные), что приводит к неоднородности прочностных свойств изделия. Это означает, что при контроле изделий из высокопрочного чугуна с помощью МЭБ необходимо учитывать возможную неоднородность распределения вида, формы, размера графитовых включений и структуры изделия по отдельным зонам и даже в пределах одной зоны.

Табл. 3. Результаты металлографического анализа, твердометрии и микромагнитных измерений на образцах, вырезанных из различных деталей

Номера отливок и наименования детали	Микроструктура по ГОСТ 3443-87	Твердость НВ	Заключение металлографической лаборатории	Показания прибора ИМШ, мВ
983/1 983/2 983/3 983/4 983/5 983/6 (направляющая)	ШГ10-ШГф5-ШГр2-ШГд25-ШГд45-П20(Ф80)-Пт1 ШГ10-ШГф5-ШГр2-ШГд25-ШГд45-П20(Ф80)-Пт1 ШГ10-ШГф5-ШГр2-ШГд25-ШГд45-П20(Ф80)-Пт1 ШГ10-ШГф5-ШГр2-ШГд25-ШГд45-П20(Ф80)-Пт1 ШГ10-ШГф5-ШГр2-ШГд25-ШГд45-П20(Ф80)-Пт1 ШГ10-ШГф5-ШГр2-ШГд25-ШГд45-П20(Ф80)-Пт1	163 – 170	высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ШГ)	312 315 203 313 312 308
883/1 883/2 883/3 883/4 (крышка стартера)	ПГф2-ПГд90-ПГд25-ПГр2-ПГр9-ПГр8-ПГ10-Пт1-Пд0,5-П20(Ф80) ПГф2-ПГд180-ПГд25-ПГр2-ПГр9-ПГ10-Пт1-Пд0,5-Пд1,0-П20(Ф80)-участки П45(Ф55)-участок П70 (Ф30) ПГф2-ПГд90-ПГд25-ПГр2-ПГр9-ПГр8-ПГ10-Пт1-Пд0,5-П20(Ф80) ПГф2-ПГд90-ПГд25-ПГр2-ПГр9-ПГр8-ПГ10-Пт1-Пд0,5-П45(Ф55)-участки П70 (Ф30)+П20 (Ф80) ПГф2-ПГд90-ПГд25-ПГр2-ПГр9-ПГр8-ПГ10-Пт1-Пд0,5-П45(Ф55)-участки П70 (Ф30)+П20 (Ф80)	126 116 118 126	серый серый серый серый	55 38 29 30
406 (картер)	[(ШГ~60%)+ВГ(~ 40%)]10-ВГф3-ВГр2-ШГд25-ШГд45-отд.ШГд90-ШГр2-ШГФ5+уч.ПГ10-ПГд45-ПГ90-ПГр2-ПГр3-ПГф2,П20(Ф80)-Пт1	167	высокопрочный с ШГ и вермикулярным	203
204 (стакан подшипников)	ШГф5-ШГф1-ШГд45-ШГд25-ШГр1-ШГ1-П6(Ф94)-Пт1	159	высокопрочный с ШГ	262
643/1 (фрагмент гайки) 643/2 (фрагмент гайки)	ШГф5-ШГд25-ШГд45-ШГр1-ШГ12-П20 (Ф80)-Пт1 От острой кромки шлифа на глубину до 7 мкм наблюдается отбел: более Ц40-Цп6000+Цп13000, далее по сечению шлифа структура – (более Ц40-Цп6000)+ (участки ПГд15 ~П20 (Ф80)-Пт1)	187 187	высокопрочный с ШГ белый	158 17

Анализ результатов показывает, что:

- вывод о преимущественном влиянии формы графита на результаты измерения магнитного шума подтверждается;
- твердость металла оказывает значительно меньшее влияние на результаты, чем форма графита (образцы 643/1 и 643/2);
- форма графитных включений оказывает влияние на интенсивность магнитного шума, но не настолько значительное, чтобы изменить отнесение чугуновой детали к одному из двух классов, характеризующих форму графитных включений;
- приближенно можно говорить о границе раздела образцов с двумя формами графитных включений, зависящей от вида исследуемого изделия; в зависимости от формы эта граница может изменяться в диапазоне от 100 до 160 единиц МШ;
- изменение уровня МШ коррелирует с видом, размерами, формой и направлением колоний графитовых включений, а также с металлической основой и дисперсностью включений.

Для оценки возможного влияния поплавочного разброса химического состава образцов из двух деталей, отнесенных к различным классам по форме графитных включений, были отобраны пробы для измерений химического состава. Результаты представлены в таблице 4. Колебания основных химических элементов в обоих изделиях незначительны и укладываются в нормативы по ГОСТ 7293-85 для высокопрочного и ГОСТ 1412-85 для серого чугунов, и не могут быть причиной существенных различий в результатах измерения МШ.

Табл. 4. Химический состав микрошлифов изделий № 983 и 883, в %.

№ изделия и марка чугуна	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Ti	Mg	Cu	Al
983 (высокопрочный)	3,7 (по ГОСТ -3,2-3,8)	2,69 (1,9-2,9)	0,38 (0,2-0,7)	0,01	0,01	0,040 (до 0,1)	0,014 (до 0,02)	0,01	0,04	0,02	0,01
883 (серый)	3,78 (2,9-3,8)	2,14 (1,2-2,6)	0,4 (0,5-1,1)	0,03	0,01	0,03 (до 0,2)	0,01 (до 0,1-0,2)	0,01	Нет	0,06	Нет

Проверка возможности распространения этих выводов на реальные чугунные изделия в условиях массового производства производилась на широкой номенклатуре деталей литейного производства МАЗ. Оценивалось соответствие результатов разбраковки деталей методом УЗК и МЭБ соответственно. Амплитуда тока перемагничивания в ПБ при измерениях МШ составляла 15 мА, а частота перемагничивания – 128 Гц. Для измерения скорости распространения ультразвука использовали индикатор структуры высокопрочного чугуна типа ИЧ, применяемый на ряде предприятий для разбраковки чугунных изделий в условиях массового производства. Измерения ультразвука производили с помощью двух преобразователей, установленных с обеих сторон стенки детали напротив друг друга. Результаты сопоставления обоих методов в виде гистограмм приведены на рис. 2, где по оси: абсцисс – номенклатура изделий, ординат – усредненные значения показаний прибора ИМШ для годных и негодных по данным УЗК изделий. Учитывая, что уровень МШ также зависит от микроструктуры и степени графитизации чугуна (с ростом количества шаровидного графита и содержания ферритной фазы в матрице показания прибора ИМШ резко возрастают), формы изделия, в такого типа экспериментах можно установить браковочные признаки для каждого изделия, которые выбирают на основании статистического анализа экспериментальных данных.

Как видно из анализа рис. 2, несовпадение полученных с помощью МЭБ и метода УЗК данных имеет место лишь для одной из деталей (крышка в сборе с редуктором), что может быть вызвано неоднородностью свойств отливок и различной локальностью места измерений обоими методами.

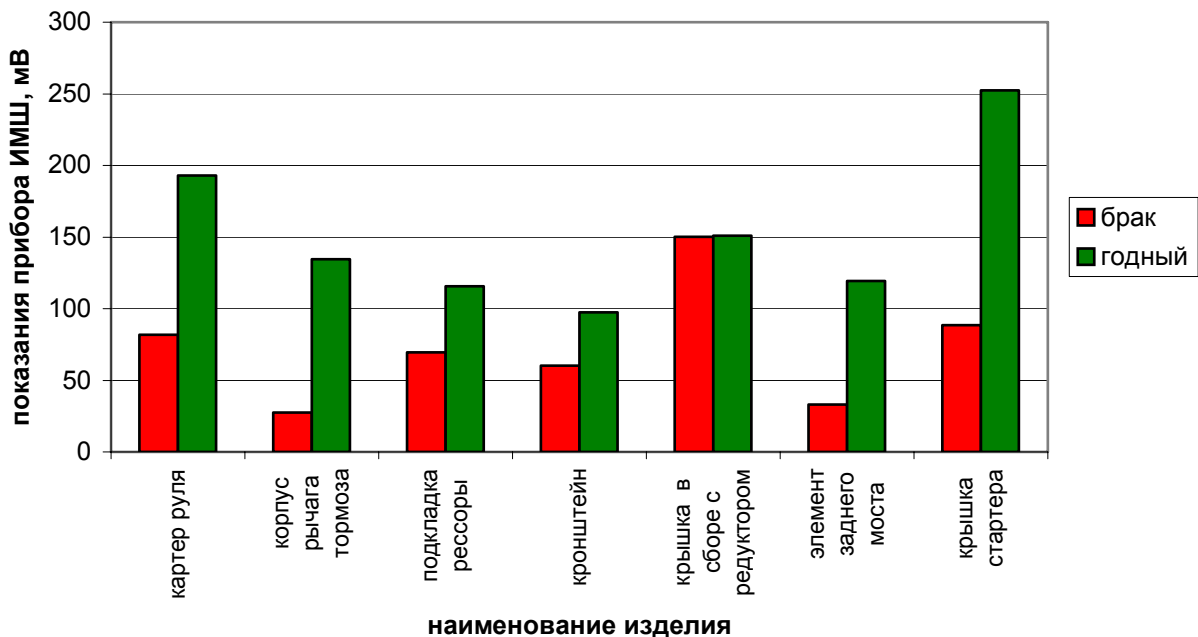


Рис. 2. Результат разбраковки различных изделий из высокопрочного чугуна с помощью МЭБ в сопоставлении с результатами по данным УЗК.

Увеличение значений МШ в высокопрочном чугуне с ростом содержания шаровидного графита в исследуемых изделиях и образцах обусловлено снижением количества зон концентраторов напряжений, которые имеет серый чугун с пластинчатым графитом. Рост уровня МШ также согласуется с увеличением прочностных свойств изделий из чугуна при растяжении и изгибе, что выражается в повышении предела временного сопротивления и относительного удлинения.

Поворот преобразователя Баркгаузена (ПБ) вокруг своей оси позволяет выявлять направления, вдоль которых уровень МШ может изменяться, что может быть связано с изменением направления пластинчатой структуры и анизотропией свойств чугуна. Это дает дополнительную информацию о его свойствах. Анизотропия магнитного шума может быть также результатом неоднородности распределения вида и формы графитовых включений в результате ликвации при кристаллизации, что согласуется с данными о наличии базисных

плоскостей, приводящих к образованию сферолитов [17]. Этот результат может оказаться полезным при решении задачи определения анизотропии механических свойств на поверхности изделий или отдельных его зон, а также при изготовлении изделий со специальными поверхностными свойствами.

Кроме представленных выше результатов контроля изделий из чугуна сложной формы производства РУПП «МАЗ» контроль осуществлялся также на изделиях, изготовленных на других предприятиях. Так, исследовалась возможность разбраковки чугунов по маркам в изделиях в форме шара диаметром 60 мм, предназначенных для измельчения цемента, изготовленных в ОАО «Белниилит». На гистограммах (рис. 3) для примера представлены сопоставительные результаты измерения уровня МШ и твердости в двух партиях изделий, каждая из которых представлена серым и высокопрочным чугуном (по два изделия каждой марки). Для повышения достоверности полученных результатов при измерении твердости и МШ на поверхности изделий с помощью операций фрезерования и шлифования готовились плоские «пятна» $\varnothing \sim 2,5$ см. Приведенные на гистограмме данные интенсивности МШ соответствуют средним значениям из 15-20 показаний прибора, при этом в площади «пятна» при сканировании по нему ПБ наблюдалась незначительная неоднородность показаний прибора. Измерения твердости (HRC) производились нами ультразвуковым твердомером МЕТ-У1 в пяти точках исследуемой зоны. Видно, что твердость изделий из серого чугуна в среднем превосходит твердость высокопрочного чугуна, и в целом, она коррелирует с маркой чугуна, однако чувствительность твердости к марке чугуна оказалась значительно ниже, чем у микромагнитного метода контроля.

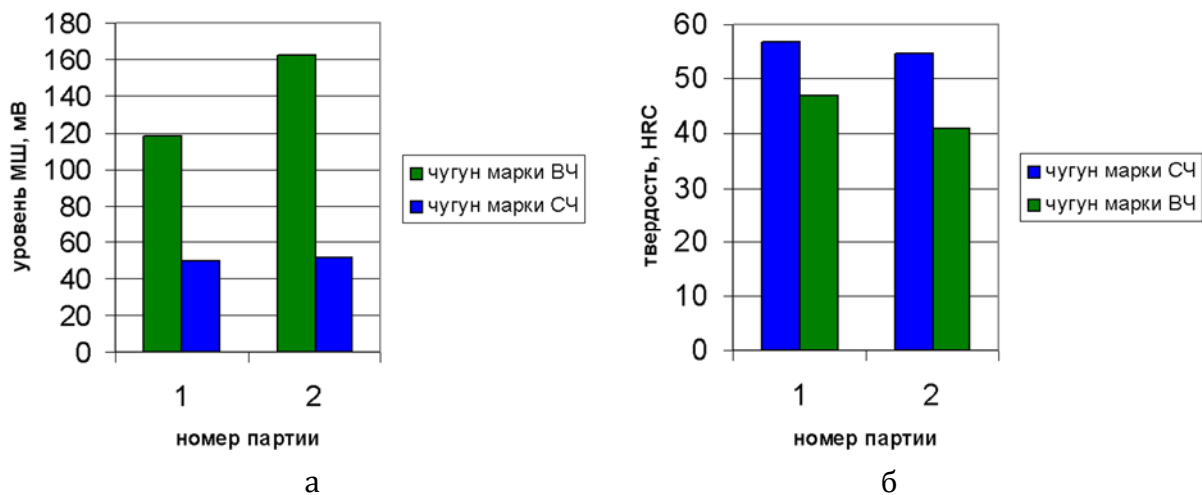


Рис. 3. Результаты разбраковки изделий из чугуна в виде шара:
 а – микромагнитным методом; б – ультразвуковым твердомером

Более высокая чувствительность МЭБ в сравнении с твердомерией связана с тем, что параметры микромагнитного метода обладают чувствительностью не только к структуре чугуна (металлической матрице), но и к форме, размерам и дисперсности графитовых включений в сплаве.

Анализ представленных выше данных показывает, что реализующий МЭБ прибор типа ИМШ можно использовать не только в качестве индикатора или «бракера» при производстве изделий из высокопрочного чугуна, но и для количественной оценки степени графитизации, дисперсности чугуна и отдельных свойств его металлической основы. МЭБ, например, можно также использовать для контроля таких важных изделий, как головки блока цилиндров дизельных двигателей, изготавливаемые из ферритного чугуна с вермикулярной формой графита, основные характеристики которого близки к чугуну с шаровидным графитом [19]. При контроле изделий из высокопрочного чугуна необходимо предварительно выбрать для каждого вида изделия численный критерий уровня МШ и построить градуировочную кривую, основанную на данных металлографического и статистического анализа. Также необходимо учесть, что информация о свойствах чугуна может быть получена преимущественно

с поверхностного слоя изделий, что иногда может быть весьма полезным, т.к. зарождение опасных повреждений, например, при усталости всегда начинается с поверхности. Поэтому при контроле изделий сложной формы необходимо тщательно выбирать контролируемые участки, являющиеся наиболее опасными.

Заключение.

Метод эффекта Баркгаузена в сравнении с другими методами и аппаратурой имеют ряд преимуществ: параметры магнитного шума обладают высокой чувствительностью к виду, форме, размеру, количеству графитовых включений, дисперсности и металлической основе, высокой производительностью контроля, удобен в эксплуатации. Микромагнитный метод и магнитошумовой анализатор типа ИМШ могут быть использованы в предприятиях для разбраковки и НК степени графитизации и структуры изделий из высокопрочного чугуна в процессе их производства в качестве самостоятельного или дополнительного к другим методам НК. Эффективность контроля чугунов при массовом производстве возрастает с увеличением степени однородности распределения шаровидного графита и структуры в поверхностных слоях изделий, а также при контроле изделий с односторонним доступом.

Авторы выражают благодарность начальнику БТК литейного цеха Н.Д. Гилю, начальнику металлографической лаборатории УЛИР РУПП «МАЗ» Е.В. Ярмолевич за оказанную помощь в предоставлении изделий, проведении ультразвуковых измерений и металлографического анализа, а также начальнику Отдела ОАО «Белниилит» Д.А. Волкову за предоставленные образцы.

Литература

1. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. –М.: Машиностроение, 1990. - 528 с.
2. Шевчук Л.А. Структура и свойства чугуна / Под ред. академика АН БССР Горева К.В. – Мн.: Наука и техника, 1978. - 216 с.
3. ГОСТ 3443-87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. – М.: Государственный Комитет СССР по стандартам, 14 с.

4. 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.
5. Сандомирский С.Г. Возможности и ограничения магнитного контроля структуры чугунных отливок (обзор) //Литье и металлургия, №2 (38), 2006. - С. 118-123.
6. Горкунов Э.С., Захаров В.А. Коэрцитиметры с приставными магнитными устройствами (обзор) //Дефектоскопия, 1995, № 8. - С. 69-88.
7. Сандомирский С.Г., Цукерман В.Л., Писаренко Л.З. Анализ предпосылок количественного контроля структуры изделий из высокопрочного чугуна магнитным методом // Литье и металлургия, № 2(34), 2005. - С. 143-148.
8. Майоров А.Л., Баев А.Р., Коновалов Г.Е., Гиль Н.Н. Результаты использования индикаторов структуры высокопрочного чугуна типа ИЧ в условиях производства //Литье и металлургия, № 2 (36), 2006. - С. 102-105.
9. 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, № 2, 2004. - С. 95-100.
10. Воронкова Л.В. Контроль чугунных отливок ультразвуком. –М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. - 25 с
11. Ивлев В.И., Яновский А.М., Снежной Р.Л. Электромагнитный метод контроля отливок из чугуна с шаровидным графитом. - М.: ГОСНИИТИ, 1962, Вып. 7. С. 454.
12. Рудяк. В.М. Эффект Баркгаузена / Успехи физических наук, 1970, т. 101, вып. 3. - С. 54-93
13. Венгринович В.Л. Магнитошумовая структуроскопия.- Мн.: Навука и тэхніка, 1991. – 285 с.
14. Венгринович В.Л., Бусько В.Н. Особенности контроля методом эффекта Баркгаузена параметров поверхностных слоев, упрочненных поверхностной пластической деформацией //Дефектоскопия, 1988, №10. – С. 56-61.
15. Бусько В.Н., Гришин С.А., Венгринович В.Л. Портативный прибор ИМШ-1 для оценки структурно-напряженного состояния ферромагнитных конструкций // Тезисы докладов международной научно-технической конференции “Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии”, г. Могилев, 2004. - С. 251-252.
16. Бусько В.Н., Венгринович В.Л., Довгялло А.Г. и др. Возможность контроля методом магнитных шумов деградации металла в результате поверхностного изнашивания /Химическая техника, 2007, № 7. - С. 46-48.
17. Худокормов Д.Н. /Литейное производство, № 5, 1967, 23.
18. Бусько В.Н., Венгринович В.Л., Чепыжов Б.А. Магнитошумовой метод неразрушающего контроля качества фасонного чугунного литья на производстве //Тезисы докладов 18-й конференции с международным участием «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». Нижний Новгород, 29.09.-03.10.2008г.-М.: Машиностроение, 2008, -310 с. - С. 219-220.
19. Крутилин А.Н., Розум В.А., Лось В.С., Панарад Ю.Г., Кузьмич А.Н., Карась А.Н. Чугун с вермикулярным графитом для деталей двигателей, работающих в условиях теплосмен // Литье и металлургия, 4 (36), 2005.- С. 47-50.