



УДК 620.179.14

Поступила 26.07.2013

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

ВОЗМОЖНОСТИ СОРТИРОВКИ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО И СЕРОГО ЧУГУНА ПО СТРУКТУРЕ ПО РЕЗУЛЬТАТУ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПАРАМЕТРА И СКОРОСТИ ЗВУКА

Приведены результаты анализа влияния изменений структуры металлической основы и формы графитовых включений в чугунах на коэрцитивно чувствительный магнитный параметр и скорость звука. Показана эффективность совместного использования результатов магнитных и ультразвуковых измерений для контроля формы включений в высокопрочном чугунах и содержания перлита в его металлической матрице.

The results of the analysis of the influence of changes in the structure of the metal substrate and form of graphite inclusions in cast iron on the magnetic coercive sensitive parameter and the speed of sound are given. The efficiency of shared use of the results of magnetic and ultrasonic measurements to control the shape of inclusions in ductile iron and pearlite content in its metal matrix is shown.

Чугун является многокомпонентным железным сплавом с содержанием углерода более 2,14%. Если при затвердевании жидкая фаза полностью переходит в смесь аустенита (твердый раствор углерода в γ -железе с предельной растворимостью углерода 2,14%) и графита, чугун называют серым (СЧ) по цвету темных кристаллов графита на изломе. В СЧ углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в виде графитовых включений пластинчатой формы. Высокопрочный чугун (ВЧ – чугун с шаровидным графитом) получают модифицированием жидкого чугуна. Шаровидный графит имеет минимальную поверхность при заданном объеме. Он меньше, чем пластинчатый, ослабляет металлическую основу чугуна, не служит активным концентратором напряжений. ВЧ имеет пластичность, износостойкость, прочность и коррозионную стойкость, близкие к свойствам стали. При этом он имеет высокую износостойкость, хорошие литейные свойства, обрабатываемость, способность гасить вибрации, низкую стоимость. Сочетание технологичности обработки и высоких эксплуатационных параметров отливок предъявляет требования и к структуре металлической матрицы ВЧ (соотношению между содержанием перлита и феррита в ней), которая определяет его твердость. Нарушения однородности и режимов модифицирования приводят к появлению отливок или их участков со структу-

рой СЧ, что снижает потребительские свойства отливок. Изменения химического состава и режимов охлаждения отливок изменяют и соотношение перлита и феррита в металлической матрице ВЧ. Это приводит к необходимости контроля структуры отливки в случаях ее последующей механической обработки и эксплуатации в ответственных узлах.

Стандартные методы определения структуры [1] 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 [1] обусловили разработку неразрушающих методов сортировки чугунов. В качестве параметра, результат изменения которого коррелирует с содержанием шаровидного графита, используют скорость V звука в металле [2, 3]. Анализ литературных данных показал, что при увеличении доли III шаровидного графита в отливке от 0 до 1 (соответственно при снижении доли пластинчатого графита от 1 до 0) скорость V звука в отливке при постоянстве других структурных параметров увеличивается примерно на 20%.

Но достоверность сортировки отливок из ВЧ по скорости V звука не всегда высока. Это связано с тем, что влияние на V в чугунах оказывает не только форма графитовых включений в нем, но и структура его металлической матрицы. Результаты ис-

следований авторов показали, что при увеличении доли $П$ перлита в чугуна с шаровидным графитом от 0 до 1 (соответственно при снижении доли феррита от 1 до 0) скорость V звука в отливке увеличивается примерно на 6% [4]. Следовательно, изменение $\DeltaШ$ доли $Ш$ шаровидных включений и изменение $\DeltaП$ доли $П$ перлита в металлической матрице отливки относительно их содержания в отливке, признанной эталонной, приведут к изменению ΔV скорости V звука в отливке:

$$\Delta V \approx 0,2\DeltaШ + 0,06\DeltaП, \quad (1)$$

где

$$\Delta V = (V_c - V_3) / V_3, \quad (2)$$

ΔV – относительное изменение скорости звука в сортируемой отливке; V_3, V_c – соответственно результат измерения скорости звука эталонной и сортируемой отливки.

Это делает невозможной селективную сортировку отливки из ВЧ и по содержанию графитовых включений сферической формы, и по соотношению между содержанием перлита и феррита в металлической матрице отливки по результатам измерения ΔV скорости V звука в отливке. Сортировка отливок из ВЧ по содержанию графитовых включений сферической формы по ΔV возможна только при незначительных изменениях соотношения между содержанием перлита и феррита в металлической матрице отливок. Сортировка отливок из ВЧ по соотношению между содержанием перлита и феррита в металлической матрице отливок по ΔV возможна только при постоянном содержании графитовых включений сферической формы в отливках.

Магнитный контроль структуры чугуновых отливок основан на различии коэрцитивной силы H_c чугунов с различной структурой. В качестве магнитного параметра отливки, прямо пропорционального ее H_c , используют остаточный магнитный поток Φ в отливке после намагничивания до технического насыщения или поле от остаточной намагниченности отливки, локально намагниченной полюсом постоянного магнита или электромагнита. Способ основан на зависимости коэрцитивной силы чугуна от формы содержащихся в нем не магнитных включений и от соотношения между содержанием перлита и феррита в металлической матрице. При этом что форма графитовых включений в чугуна и структура его металлической матрицы оказывают влияние на H_c чугуна аддитивно. Результаты проведенных авторами исследований [5–7] показали, что увеличение доли $П$ перлита в чугуна от 0 до 1 увеличивает прямо магнитный параметр Φ и, следовательно, H_c отливки

примерно в 2,8 раза. При этом увеличение доли $Ш$ шаровидного графита чугуна от 0 до 1 уменьшает H_c отливки и прямо пропорциональный ей магнитный параметр Φ примерно в 1,6 раза. Следовательно, изменение $\DeltaШ$ в доле $Ш$ шаровидных включений и изменение $\DeltaП$ в доле $П$ перлита в металлической матрице отливки приведут к изменению $\Delta\Phi$ прямо пропорционального H_c отливки магнитного параметра Φ :

$$\Delta\Phi \approx -1,6\DeltaШ + 2,8\DeltaП, \quad (3)$$

где

$$\Delta\Phi = (\Phi_c - \Phi_3) / \Phi_3, \quad (4)$$

$\Delta\Phi$ – относительное изменение параметра Φ сортируемой отливки; Φ_3, Φ_c – соответственно результат измерения магнитного параметра Φ эталонной и сортируемой отливки.

Это делает невозможным использование результатов измерения $\Delta\Phi$ для селективной сортировки отливки из ВЧ и по содержанию графитовых включений сферической формы, и по соотношению между содержанием перлита и феррита в металлической матрице отливки. Сортировка отливок из ВЧ по содержанию графитовых включений сферической формы по $\Delta\Phi$ возможна только при постоянстве соотношения между содержанием перлита и феррита в металлической матрице отливок. Сортировка отливок из ВЧ по соотношению между содержанием перлита и феррита в металлической матрице отливок по $\Delta\Phi$ возможна только при незначительном изменении содержания графитовых включений сферической формы в отливках.

Известно, что дополнительное измерение физического параметра, несвязанного с распространением звука в отливке (например, твердости НВ отливки), повышает достоверность сортировки отливки из ВЧ по структуре [2]. Но достоверность сортировки при дополнительном измерении НВ отливки увеличивается не на много, а производительность снижается из-за низкой производительности измерения твердости. Невысокая достоверность сортировки связана с тем, что твердость характеризует свойства отливки на локальном участке ее поверхности. Эти свойства не всегда однозначно связаны со структурой металла отливки во всем ее объеме. Кроме того, форма графитовых включений в чугуна и структура его металлической матрицы оказывают влияние на твердость НВ отливки и скорость V звука в ней аддитивно. При этом увеличение содержания шаровидного графита в отливке, повышающее предел ее прочности, по данным [2], приводит к возрастанию и НВ отливки, и V в ней. Это снижает возможности селектив-

ной сортировки отливки и по содержанию графитовых включений сферической формы, и по соотношению между содержанием перлита и феррита в металлической матрице отливки по V и H_V .

Для повышения производительности и достоверности сортировки отливки из ВЧ по структуре воспользуемся тем, что по результатам ΔV и $\Delta \Phi$ определения по формулам (2) и (4) относительной разницы между скоростью V звука и магнитным параметром Φ в эталонной и сортируемой отливках можно селективно найти неизвестные величины ΔIII и ΔII как результат решения системы двух линейно независимых уравнений (1) и (3) с двумя неизвестными:

$$\Delta III = 4,27\Delta V - 0,09125\Delta \Phi, \quad (5)$$

$$\Delta II = 2,44\Delta V + 0,305\Delta \Phi. \quad (6)$$

Согласно разработанной методике сортировки отливки из ВЧ, по структуре предварительно измеряют скорость V звука и магнитный параметр Φ эталонной отливки, которую отбирают из отливок, заведомо годных по содержанию шаровидных включений и содержанию перлита в металлической матрице. Затем измеряют V и Φ в сортируемой отливке, определяют разницу ΔV и $\Delta \Phi$ скорости V звука и измеренного магнитного параметра Φ в сортируемой и эталонной отливках, по которым по формулам (5) и (6) определяют разницу ΔIII в содержании шаровидных включений и разницу ΔII в содержании перлита в металлической матрице сортируемой и эталонной отливок. Сортировку отливки осуществляют по результату сравнения ΔIII и ΔII с их допустимыми значениями.

Повышение производительности сортировки обеспечивается за счет более производительного по сравнению с измерением твердости измерения коэрцитивной силы отливки или пропорционального ей магнитного параметра Φ .

Повышение достоверности сортировки отливки из ВЧ по структуре обеспечивается за счет того, что измеренный магнитный параметр в большей степени, чем твердость отливки, характеризуют структуру металла отливки во всем его объеме. Повышение достоверности сортировки отливки обеспечивается также возможностью селективной сортировки отливки и по содержанию графитовых включений сферической формы, и по соотношению между содержанием перлита и феррита в металлической матрице отливки.

Высокую селективность определения величин ΔIII и ΔII обеспечивает то, что увеличение доли II перлита в чугуна повышает и скорость звука V , и коэрцитивную силу H_c отливки или прямо про-

порциональный H_c отливки магнитный параметр Φ , а увеличение доли III шаровидного графита в материале отливки увеличивает V и уменьшает Φ .

Эффективность методики иллюстрирует следующий пример ее реализации для сортировки по структуре отливок сложной формы (длиной 70 мм, поперечным размером до 38 мм), изготавливаемых на одном из литейных заводов из высокопрочного чугуна марки ВЧ50. В качестве прямо пропорционального H_c отливок магнитного параметра использован остаточный магнитный поток Φ , сохраняющийся в них после намагничивания до состояния, близкого к техническому насыщению. Измерения Φ проведены анализатором магнитным МАКСИ-Р, описание которого приведено в [5]. В приборе МАКСИ-Р максимальная напряженность намагничивающего поля на оси датчика равна 37 кА/м. Диапазон измерения Φ : 0,01–6,00 мкВб (значению 0,6 мкВб соответствуют показания прибора $\Phi = 100$). Относительная погрешность измерения Φ не более $\pm 1,5\%$. Производительность сортировки изделий по результатам измерения – до 2 изделий в секунду. Скорость V звука в отливках измерена ультразвуковым толщиномером фирмы «Kraut Kramer».

Показание прибора МАКСИ-Р при измерении параметра Φ изделия, выбранного из отливок, заведомо годных по содержанию шаровидных включений и содержанию перлита в металлической матрице материала отливки, составило $\Phi_3 = 220$, а скорость V звука в эталонном изделии $V_3 = 5575$ м/с. После измерений Φ_3 и V_3 эталонное изделие было разрушено для изготовления микрошлифа и определения его структуры по [1]. Было установлено, что микроструктура эталонной отливки соответствует микроструктуре шаровидного графита (содержание шаровидного графита – 100%), а содержание перлита в металлической матрице эталонной отливки составляет 50%.

После этого пять отливок, отобранных из промышленной партии, были рассортированы по структуре разработанным способом. Результаты определения разницы ΔIII в содержании шаровидных включений и разницы ΔII в содержании перлита в металлической матрице сортируемой и эталонной отливок приведены в таблице. В качестве критерия годности сортируемых отливок (как того требовали технические условия производства отливок данного типа) было выбрано снижение доли шаровидных включений и доли перлита в сортируемых отливках не более чем на 10% по сравнению с эталонной отливкой. Результаты сортировки отливок разработанным способом в соответствии с установленным критерием годности приведены в

Результаты сортировки отливок по предложенному способу и стандартной разрушающей методике [1]

Номер изделия	Результаты измерений		Результаты сортировки					
	$V_c, \text{ м/с}$	$\Phi_c, 6 \cdot 10^{-3} \text{ мкВб}$	разработанным способом			по стандартной методике		
			$\Delta III, 100\%$	$\Delta II, 100\%$	брак, годное	$\Delta III, 100\%$	$\Delta II, 100\%$	брак, годное
1	4960	125	-43	-40	Брак	-50	-20	Брак
2	5540	170	-1,5	-8	Годное	0	-5	Годное
3	5684	268	+6,4	+12	Годное	0	+20	Годное
4	5491	128	-2,6	-17	Брак	0	-25	Брак
5	5412	111	-8	-22	Брак	-10	-37	Брак

таблице. После сортировки отливок для проверки результатов сортировки структура рассортированных отливок была определена по стандартной методике [1]. Результаты определения структуры отливок по стандартной методике также приведены в таблице.

Анализ приведенных в таблице результатов сортировки отливок по разработанной методике показал, что они совпадают с результатами сортировки отливок по стандартной разрушающей методике [1]. Количественно результаты определения разницы ΔIII в доле III шаровидных включений и разницы ΔII в доле II перлита в металличе-

ской матрице сортируемой и эталонных отливок по разработанной и стандартной методикам совпадают в пределах погрешности и субъективности определения этих параметров по стандартной методике.

Таким образом, применение разработанной методики повышает достоверность сортировки отливок из высокопрочного чугуна по структуре до уровня достоверности стандартной разрушающей методики [1]. Кроме того, разработанная методика обеспечивает сортировку отливки по параметрам, усредненным по всему объему отливки, а не по ее локальным участкам, как у стандартной методики.

Литература

1. ГОСТ 3443-87. Методы определения структуры. М.: Изд-во стандартов, 1990.
2. Воронкова Л. В. Контроль чугунных отливок ультразвуком. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
3. 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.
4. Сандомирский С. Г., Цукерман В. Л. Влияние структуры металлической матрицы высокопрочного чугуна на коэрцитивно чувствительный магнитный параметр и скорость звука // Литье и металлургия. 2013. № 2. С. 41–45.
5. 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.
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., Цукерман В. Л., Писаренко Л. З. Анализ влияния структуры отливок из высокопрочного чугуна на сигналы накладных магнитного и электромагнитного датчиков // Литье и металлургия. 2009. № 4. С. 44–47.