



The results of development of the indicator of high-strength pig-iron are submitted in the report. The indicator allows to carry out the testing of the pig-iron structure in conditions of manufacture without additional preparation of the casting surface.

А. Л. МАЙОРОВ, А. Р. БАЕВ, Г. Е. КОНОВАЛОВ, Н. Н. ГИЛЬ,
ГНУ «ИПФ НАН Беларуси»

УДК 621.179

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДИКАТОРОВ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ТИПА ИЧ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА

Сегодня невозможно представить машиностроительное производство без использования чугуна. Применение чугунов позволяет в значительной степени сократить затраты, связанные с производством изделий сложной конфигурации. Чугун является одним из основных конструкционных материалов, используемых как литейный сплав. Легирование чугунов позволило получить чугун с шаровидным графитом, что дало возможность в значительной степени повысить его прочность. Благодаря хорошим механическим свойствам из высокопрочного чугуна изготавливают ответственные детали, например, коленчатые валы, зубчатые колеса, корпуса автомобильных моторов, крупные прокатные валки, корпуса паровых турбин и др.

Однако следует отметить, что до настоящего времени проблема формообразования графита не решена в такой степени, чтобы можно было предсказывать с полной уверенностью структуру чугуна в результате плавки и термической обработки [1, 2]. Это вызывает необходимость проведения исследований структуры полученного чугуна. В подавляющем большинстве случаев на предприятиях контроль структуры чугуна осуществляется преимущественно разрушающими методами, включая металлографию, испытания на разрыв, твердость и др. При высокой информативности эти методы трудоемки и длительны. Кроме того, необходимо учитывать, что поскольку взятие пробы производится локально из определенной части отливки (например, из литника), то далеко не всегда по результатам исследований представляется возможным судить о структуре и физико-механических свойствах отливок во всем объеме. Особенно это касается заготовок, имеющих сложную форму, большую разницу в толщинах в разных частях отливки.

Известно немало попыток применения неразрушающих методов к контролю отливок чугуна. Наибольшую известность получили акусто-реверберационные методы, которые построены на анализе амплитуды и спектра свободных колебаний в изделии. Эти методы являются интегральными и успешно работают только на отливках простой формы. В этом случае в качестве выходных параметров используются декремент затухания Δ , обусловленный поглощением и рассеянием упругих волн на микронеоднородностях металла (графитовых включениях), и упругие константы материала, зависящие от основы и формы графитовых включений. Магнитные методы, основанные на анализе петли гистерезиса кривой намагничивания, существенно зависят от формы изделия и свойств основы. Однозначного ответа о структуре графита они не дают, в особенности в изделиях сложной формы. Локальные магнитные методы не позволяют проанализировать структуру на большую глубину.

Наиболее перспективным, на наш взгляд, является использование ультразвуковых методов. Это связано с тем, что параметры распространения упругих волн (скорость, коэффициент затухания) связаны со структурой и механическими характеристиками чугуна. Ранее разными авторами были проведены исследования зависимости параметров распространения упругих волн от структуры чугуна (формы графитовых включений и материала основы) [3, 4]. Было установлено, что модуль Юнга у чугунов с шаровидным графитом более чем в 2 раза превышает модуль Юнга у серых чугунов с хлопьевидным графитом. Скорость упругих продольных волн является величиной, напрямую зависящей от модуля Юнга. На рис. 1 показаны зависимости скорости продольных волн от процентного содержания шаро-

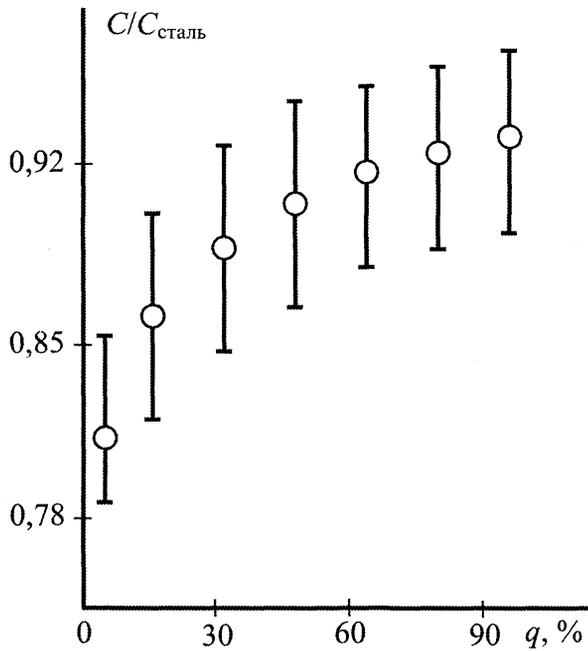


Рис. 1. Влияние содержания шаровидного графита на скорость продольной упругой волны в чугунах: верхняя граница соответствует мелким по размеру графитовым включениям, нижняя — крупным

видного графита в чугунах. Данные зависимости имеют одинаковую характерную форму различных по размеру графитовых включений. Поэтому являются хорошей основой для применения скорости распространения ультразвука в качестве основного информационного параметра. Затухание ультразвука также зависит от содержания шаровидного графита. Чем больше шаровидного графита, тем меньше затухание. Однако измерение затухания — более сложная процедура, чем измерение скорости и соответственно результаты таких измерений имеют значительно меньшую точность. Следует учитывать, что скорость звука в свою очередь зависит не только от формы графита, но и от его концентрации и размера. Но при этом зависимость от формы графитовых включений наибольшая.

Известно, что структура и свойства чугуна меняются от производства к производству. Металлической основой высокопрочного чугуна могут быть феррит, феррит с перлитом и перлит. По нашим измерениям, чугуны с перлитной основой имеют скорость продольной упругой волны ~ на 5–7% больше, чем в чугунах с ферритной основой. Это связано с тем, что в перлитном чугуне 0,8% углерода находится в связанном состоянии и не участвует в формировании упругих свойств. С увеличением доли феррита появляется больше свободного графита, который и оказывает влияние на скорость распространения. Эти изменения могут быть учтены при определении формы графита по скорости звука.

Мешающим фактором, который в значительной степени может сказаться на результатах из-

мерений, является наличие цементита. Скорость распространения упругих волн в цементите соответствует стали. Поэтому в зависимости от процентного содержания цементита ошибка измерений может быть фатальной и привести к недобраковке при фактическом наличии серого чугуна. В то же время, если при производстве предпринимаются необходимые меры для получения чугуна с шаровидным графитом, получение белого чугуна с большим содержанием цементита является маловероятным. Отбел может возникнуть на поверхности и в этом случае он легко определяем (можно измерить скорость поверхностной волны или просто попробовать обработать поверхность напильником). В данной ситуации при измерении скорости следует учитывать толщину слоя отбела.

Важная характеристика высокопрочного чугуна — временное сопротивление при растяжении. Считается, что эта величина прямо пропорциональна твердости чугуна и модулю Юнга. Причем для разных чугунов данная зависимость определяется технологией получения чугуна и его основой. Как уже указывалось выше, модуль Юнга может быть измерен достаточно точно по скорости распространения продольных упругих волн. Но твердость не может быть измерена с достаточной точностью акустическими методами. Она определяется в основном структурой металлической основы и в меньшей степени параметрами графитовых включений. Для определения временного сопротивления при растяжении требуется построение корреляционных зависимостей для конкретного вида чугуна. Опыт построения таких зависимостей показывает, что данный параметр может определяться неразрушающими методами с точностью не менее 7–10%.

Анализ факторов, действующих на производстве и оказывающих влияние на качество конечного продукта, показывает, что в принципе основные параметры, характеризующие чугун, могут быть получены в условиях лабораторных исследований путем прямых измерений на соответствующем оборудовании. Однако такие измерения могут быть проведены только на единичных изделиях и образцах-свидетелях. К сожалению, результаты, полученные при таких измерениях, далеко не всегда соответствуют настоящему состоянию чугуна во всей партии изделий или в различных частях отливки. Насущным является наличие инструмента, который позволил бы проверять все детали. Анализ показывает, что важнейшей характеристикой высокопрочного чугуна при прочих равных условиях является степень сфероидизации графита, т.е. если лабораторными испытаниями на образцах-свидетелях установлено, что чугун соответствует предъявляемым ему требованиям, то в дальнейшем необходимо проверить сфероидизацию графита на всех ответственных отливках в ответственных сечениях.

Исходя из этого, можно сформулировать основные требования к оборудованию для проверки чугуна: возможность проведения измерений непосредственно в условиях литейного производства; прибор должен быть переносным, так, чтобы его можно было носить от отливки к отливке, а не отливку к нему; автономное питание; простота измерений, отсутствие специальных требований к квалификации персонала; возможность измерения непосредственно на отливке без подготовки поверхности. Такой прибор был разработан и получил название «индикатор высокопрочного чугуна» ИЧ.

В качестве основной схемы измерений был принят теневой метод, т.е. когда анализируемая область размещается между преобразователями (рис. 2). Исследования показали, что при измерениях непосредственно на отливках использование зеркально-теневых методов приводит к значительным ошибкам за счет разных условий отражения на литой поверхности. В частности, возникают дополнительное рассеяние, изменение диаграммы направленности и непредсказуемое изменение фазы сигнала.

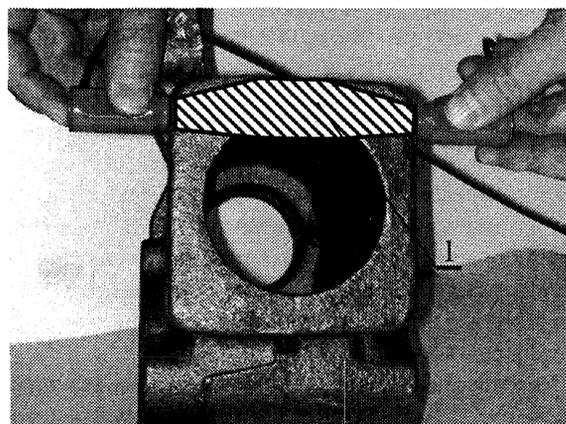


Рис. 2. Схема применения теневого метода: I — область анализа структуры чугуна

Общая методология измерений построена на сравнении истинного размера отливки (измеренного, например, штангенциркулем между приложенными датчиками) с граничными размерами, полученными с помощью индикатора. При проведении обследования индикатор измеряет временной промежуток, необходимый акустическому сигналу для преодоления расстояния между преобразователями. На основании полученных данных о скорости звука для серого и высокопрочного чугуна время распространения пересчитывается в линейный размер для этих чугунов. Промежуточные значения говорят о частичной сфероидизации графита или наличии вермикулярного графита. Такая схема была выбрана исходя из того, что измерения расстояния являются самыми простыми и общедоступными. Для их проведения нет необходимости тратить время и средства на обучение персонала.

Для определения граничных зависимостей скоростей звука для серого и высокопрочного чугунов были выполнены предварительные исследования на образцах серого и высокопрочного чугунов, произведенных на разных заводах. В результате установлены существенные зависимости между скоростью ультразвука и маркой серого чугуна. В частности, показано, что при изменении марки чугуна с СЧ10 до СЧ20 скорость продольной волны C изменяется от 3300 до 4200 м/с. При этом верхний предел скорости C_{\max} для серого чугуна составляет ~ 4900 м/с. Такая зависимость, по-видимому, обусловлена вариацией размеров вкраплений пластинчатого графита, что сопровождается изменением упругих констант и соответственно прочности чугуна.

Обобщение данных по скорости звука для высокопрочного чугуна с шаровидной формой графитовых включений дает значение минимальной скорости $C_{\min} \sim 5550$ м/с.

Для того чтобы обеспечить необходимую точность измерения временного интервала, нужно получить акустический импульс с крутовозрастающей амплитудой. Для этого следует добиться широкой частотной полосы пропускания преобразователей. С этой целью были разработаны специальные электроакустические преобразователи с высоким демпфированием и акустически жестким протектором из керамики. Следует отметить, что обычно не принято использовать для шероховатых поверхностей с классом обработки хуже чем $R_z 40$ преобразователей с акустически жестким протектором. Это объясняется рассеянием в промежуточном контактном слое. Но так как мы используем теневую схему контроля, то процессы, происходящие в этой зоне, могут быть учтены с помощью постоянной поправки. Преимуществом является постоянство зазора по сравнению с акустически мягким протектором, что позволяет обеспечить необходимую точность измерений.

В индикаторе предусмотрено программное обеспечение управления амплитудой генератора. Это позволяет регулировать амплитуду сигнала для того, чтобы она находилась примерно на одинаковом уровне при разной базе измерений (расстоянию между преобразователями).

Индикация результатов обследования отливок представляется на жидкокристаллическом дисплее в виде двух граничных значений расстояний. На рис. 3 показан пример полученной информации. Если истинное значение больше (равно) значения, указанного в правой части индикатора (на рис. 3 в качестве примера это значение равно 120 мм), то чугун в отливке соответствует высокопрочному чугуну. Если истинное значение меньше (равно) значения, указанного в левой части индикатора (на рис. 3 в качестве примера это значение равно 105,9 мм), то данная отливка выполнена из

серого чугуна. Истинное расстояние между поверхностями, измеренное штангенциркулем, может оказаться в интервале между значениями, указанными на индикаторе (например, 115 мм). Такая область обозначена на индикаторе как <<??>> (рис. 3). Это значит, что в отливке произошла только частичная сфероидизация графита, т.е. в обследуемой части отливки присутствует как сферический, так и хлопьевидный графит.

Предусмотрены два режима работы индикатора:

при первом режиме оператор сравнивает расстояние между поверхностями отливки, на которые устанавливают датчики во время обследования (измеренное штангенциркулем), с размерами отливки, выведенными на дисплей индикатора;

во втором режиме реальное расстояние между этими поверхностями вводят в память индикатора заранее. Тогда в результате контроля отливки индикатор не только выводит на дисплей измеренные расстояния, но и включает один из светодиодов. Красный – если отливка из серого чугуна или зеленый – если отливка из высокопрочного чугуна.

Первый режим целесообразно использовать, когда расстояние между поверхностями, к которым прижимают датчики во время контроля, изменяется от детали к детали. Например, это могут быть разные места отливок.

Второй режим более производительный, но может использоваться только для таких отливок, линейные размеры которых мало изменяются от детали к детали.

К настоящему времени предложенные способ и оборудование используются на целом ряде предприятий. Индикатор позволяет проводить измерения непосредственно в отливках. Подготовка отливки к контролю требует только дробеструйной очистки от окалины. Можно обследовать отливки и после нанесения грунтовки, даже если она еще не высохла. Все это позволяет оперативно проверять 100% продукции, так как контроль занимает всего несколько секунд на измерение.

Опыт применения индикаторов в промышленности показывает.

1. Предложенный метод и оборудование (индикатор ИЧ) позволяют проводить 100%-ный контроль продукции в условиях литейного производства.

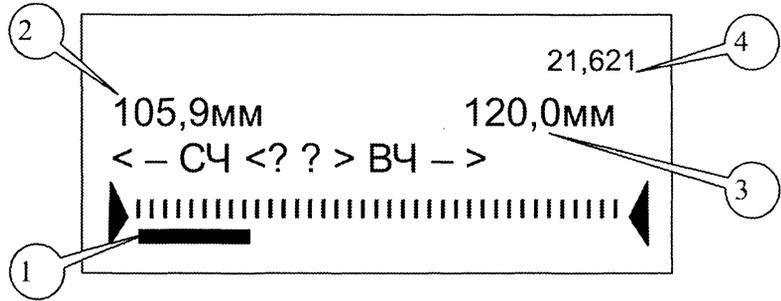


Рис. 3. Представление результата контроля на дисплее индикатора: 1 – изменяющаяся во время измерений линия характеризует начало поступления в индикатор информации от датчиков; 2 – граничное значение для серого чугуна; 3 – граничное значение для высокопрочного чугуна; 4 – дополнительная числовая информация, определяющая время распространения сигнала

2. Использование индикатора дает возможность отказаться от интегральной оценки структуры чугуна в отливке, а проверять ответственные сечения.

3. Индикатор не требует привлечения специально обученного персонала к процессу измерений.

4. Индикатор может использоваться как при производстве высокопрочного чугуна, так и при входном контроле.

5. Полученные зависимости скорости звука от марки чугунов (особенно серых) позволяют проводить работы по разработке методики разбраковки чугунов по маркам на базе разработанного способа и оборудования.

В заключение следует отметить, что перед разработанным индикатором не ставилась задача замены всего комплекса испытательного оборудования для проверки механических свойств чугуна. Но лабораторные исследования позволяют испытывать только единичные экземпляры продукции или образцы-свидетели. Использование индикатора дает возможность проводить контроль всей продукции. Статистика показывает соответствие результатов, полученных с помощью индикатора, с результатами разрушающих методов исследования.

Литература

1. Гуляев А.П. *Металловедение*. М.: *Металлургия*, 1986.
2. Неижко И.Г. *О теориях образования шаровидного графита // Кристаллизация, структурообразование и свойства модифицированного чугуна*. Киев: *ИПЛ АН УССР*, 1982.
3. Воронкова Л.П. *Ультразвуковой контроль чугуна*. М.: *ЦНИИМАШ*, 1996.
4. Иванушкин П.Н. *Неразрушающий контроль чугуна*. Киев: *Навукова думка*, 1983.