
Ультразвуковой контроль отливок из чугуна



**Воронкова
Любовь
Владимировна**

Вед. научн. сотрудник
ЦНИИТМАШ,
к. т. н., III уровень
по акустическому
виду НК.

К чугунам относят сплав железа с углеродом, содержащий более 2,14% углерода. Чугун издавна (в России — с 16 века) применяется как наиболее дешевый литейный материал при производстве разнообразных и сложных отливок. Возможности ультразвуковой дефектоскопии, структуроскопии и контроля механических свойств чугуна еще мало изучены. Первые работы по УЗК чугуна в нашей стране принадлежат Н. В. Химченко и В. Н. Приходько [1], за рубежом — Р. Циглеру и Р. Герстнеру [2]. Данная работа делает шаг в этом направлении.

Дефектоскопия чугунных отливок

В 1950-х гг., когда разрабатывались основные методики УЗК стали, чугун был признан недефектоскопичным из-за большого затухания ультразвука в нем. Действительно, у серого чугуна низких марок, такого, как СЧ-10 и ниже, коэффициент затухания ультразвука в несколько раз превышал его значение для стали, но для СЧ-20 и более высоких марок чугуна существенных помех для дефектоскопии не существовало. В 1964 г. фирмой «Карл Дойч» (Германия) была создана ультразвуковая установка и оборудован стенд дефектоскопии отливок из чугуна с пластинчатым и шаровидным графитом [3]. В отличие от аустенитного сварного соединения, чугунная отливка является изотропным материалом. На дефектоскопичность чугунных отливок влияют несколько факторов, но в первую очередь — форма графита. В табл. 1 представлены данные о возможности контроля отливок из различных марок чугуна [4]. Видно, что контроль чугуна с шаровидным графитом более эффективен, чем с пластинчатым.

Табл. 1. Максимальная глубина прозвучивания отливок из чугуна

Частота преобразователя, МГц	5,0	2,5	1,0
Вид чугуна	Максимальная глубина прозвучивания, мм		
Чугун с шаровидным графитом	до 100	100–300	100–300
Чугун с вермикулярным графитом	до 20	до 100	100–300
Чугун с пластинчатым графитом	–	до 20	до 100

При дефектоскопии чугунных отливок используется эхо-метод для обнаружения дефектов типа газовых раковин, трещин с хорошо отражающей поверхностью, а также зеркально-теневой метод для обнаружения скоплений мелких пор, шлаковых включений с рассеивающей поверхностью. Каждая марка чугуна, тип отливки и дефекта требуют разработки специальной методики.

Для обнаружения координат дефектов типа пористости в отливке «корпус» из чугуна с шаровидным графитом применяется зеркально-теневой метод. Измерения проводятся по чистой литой поверхности с помощью прямых совмещенных ПЭП с частотой 1,25 МГц и диаметром пьезопластины 25 и 50 мм путем прозвучивания в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Критерием определения границы дефектной зоны является уменьшение амплитуды донного сигнала до заданного порогового уровня, величина которого зависит от типа отливки, рабочей частоты и размера преобразователя [5].

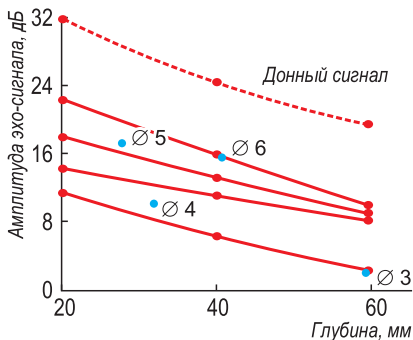


Рис. 1. АРД-диаграмма для прямого совмещенного ПЭП с частотой 1,25 МГц, чугун СЧ-20

Для оценки чувствительности эхо-метода выполнены экспериментальные исследования на образце типа «ступенька» из серого чугуна СЧ-20 с искусственными дисковыми отражателями диаметрами 3, 4, 5, 6 мм и построена АРД-диаграмма (рис. 1). Контроль отливок осуществлялся прямыми совмещенными ПЭП на частоте 1,25–2,5 МГц, что позволило обнаружить ряд естественных дефектов [5] и определить по АРД-диаграмме их эквивалентные размеры.

Дефектоскопия поверхностных дефектов чугунного литья сводится к определению глубины проникновения дефекта внутрь отливки. При этом

может оказаться информативной методика, использующая поверхностные волны. На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований прохождения волны Рэлея через пропилы толщиной 2 и 0,5 мм в стальном образце и пористости, выходящей на поверхность образца чугуна с шаровидным графитом (кривые 1–3, соответственно). Измерения проводились ПЭП с частотой 1,8 МГц теневым методом. Излучатель и приемник были жестко закреплены в одном корпусе с базой прозвучивания 20 мм. Изменение амплитуды волн Рэлея с увеличением глубины пропила и пористости отсчитывалось от значения амплитуды на бездефектном участке. Технология изготовления пропила шириной 0,5 мм не исключает наличия перемычек в нем. Пористость представляет совокупность металлических «мостиков». Геометрия этих несплошностей схожа, поэтому кривые для этого пропила и пористости довольно близки. Полученная зависимость применена при измерениях пористости, выходящей на поверхность отливки из чугуна с шаровидным графитом (рис. 3). При вскрытии «двухгорбый» рельеф пористости как функция перемещения преобразователя вдоль дефекта и максимальная ее глубина (8 мм) подтвердились. Волны Рэлея могут быть использованы для дефектоскопии подповерхностных дефектов (глубиной меньше 5 мм). Надежно получается определение дефектного участка отливки.

Если есть необходимость в определении глубины подповерхностного дефекта, можно воспользоваться эхо-методом. Раздельно-совмещенный

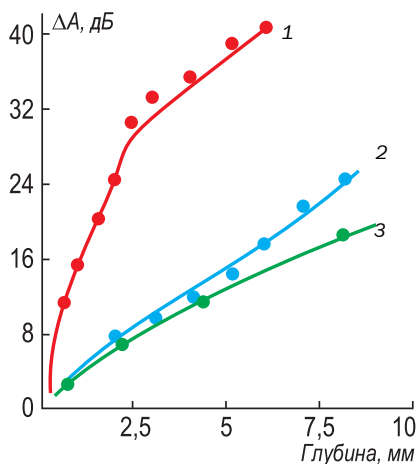


Рис. 2. Зависимость амплитуды поверхностной волны от глубины пропила и пористости: • — пропила шириной 2 мм; • — пропила шириной 0,5 мм; • — пористость

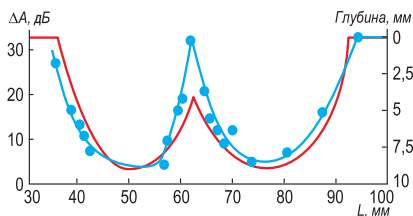


Рис. 3. Измерение глубины реальной пористости поверхностными волнами на отливке типа «плита»: прогноз глубины пористости по акустическим измерениям, • — амплитуда поверхностной волны, • — реальные размеры дефекта

прямой ПЭП позволяет измерить глубину несплошности от 1 до 25 мм с погрешностью $\pm 0,5$ мм.

УЗК структуры чугуна

В промышленности структура чугуна определяется разрушающим металлографическим методом, который является не совсем представительным для отливок сложной формы и разной толщины. УЗК структуры чугуна устранил бы большинство недостатков металлографического метода, однако его применение сдерживается тем, что акустические характеристики (скорость и коэффициент затухания ультразвука) зависят от технологических особенностей получения чугуна. Поэтому для конкретного вида чугуна, отлитого на конкретном заводе, необходимо разрабатывать свою методику.

Использовать ультразвук для контроля структуры металла впервые предложил наш соотечественник С. Я. Соколов [6]. Его идеи для структурного анализа чугуна получили развитие в [1] и [2]. Вначале было обращено внимание на связь формы графитных включений со скоростью

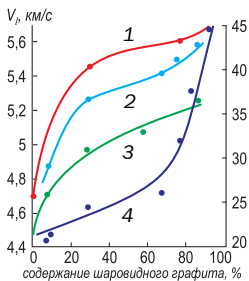


Рис. 4. Влияние размеров и содержания шаровидного графита на скорость продольной волны: 1 – мелкий графит; 2 – средний графит; 3 – крупный графит; 4 – отношение сигнал/помеха

продольной волны. Известно, что модуль Юнга чугуна с шаровидным графитом более чем в 2 раза превышает модуль Юнга чугуна с пластинчатым графитом. Скорость V_l продольной волны как величина, зависящая от модуля Юнга, также меняется с изменением формы графита. Кривая, описывающая влияние формы графита на величину V_l [2], приведена на рис. 4. Вид зависимости неизменен, но кривая может сдвигаться по оси ординат

при изменении размера графитных включений. В большинстве работ для различных толщин и технологий получения отливок величина пограничной скорости V_l между шаровидной и вермикулярной формами графита колеблется от 5,1 (толстостенные отливки) до 5,5 км/с. Автором предложено использовать для определения формы графита отношение сигнал/помеха. Максимальный уровень структурных помех измеряется вблизи донного сигнала. Это отношение зависит от V_l , коэффициента

рассеяния ультразвука и длительности ультразвукового импульса [2]. Как известно, V_l и коэффициент рассеяния ультразвука зависят от формы графита, что позволяет предположить наличие такой же зависимости и у отношения сигнал/помеха. Проведенный эксперимент доказывает справедливость этого предположения (рис. 4). Отношение сигнал/помеха удобно использовать для оценки формы графита при отсутствии второго донного сигнала, необходимого для вычисления скорости распространения волны и коэффициента затухания.

При контроле отливок сложной формы, не позволяющей измерить V_l в зависимости от толщины, можно использовать поверхностные волны. Авторы [7] определили пограничное значение скорости поверхностной волны между чугуном с шаровидной и вермикулярной формами графита: $2,74 \div 2,93$ км/с. Головные волны также могут быть использованы для оценки формы графита, что подтверждено внедрением этой методики на АО «КАМАЗ».

Для определения формы графита в чугуне также используется коэффициент затухания ультразвука [8], который уменьшается с увеличением доли шаровидного графита, и эта зависимость линейна. Однако большая ошибка измерения коэффициента затухания (10%) по сравнению с ошибкой измерения V_l (1%) делает измерение последней более приемлемым для практики.

В меньшей степени, чем форма графита, на акустические характеристики чугуна влияют количество графитных включений и их размер. Влияние параметров графитных включений на V_l так велико, что, варьируя ими, можно изменить значение V_l в 2 раза.

При неизменном содержании углерода, размере и форме графитовых включений можно проследить влияние структуры металлической основы (содержание перлита, феррита, цементита) чугуна на его акустические характеристики. Обычно V_l в перлитной основе на 5–10% больше, чем в ферритной [9]. Для коэффициента затухания существует свой вид зависимости от структуры металлической основы для каждого конкретного вида чугуна.

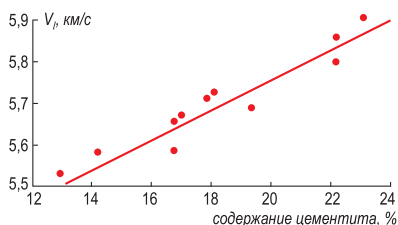


Рис. 5. Влияние содержания цементита в металлической основе чугуна с шаровидным графитом на величину скорости продольной волны

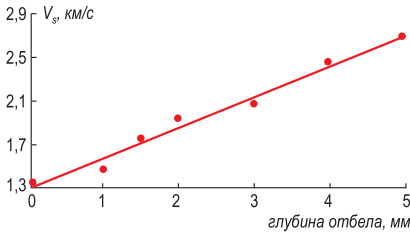


Рис. 6. Зависимость скорости поверхностной волны от глубины отбеленного слоя в сером чугуна

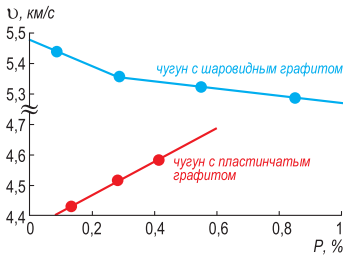


Рис. 7. Влияние содержания фосфора в металлической основе чугуна с шаровидным и пластинчатым графитом на величину скорости продольной волны

Чугун, содержащий цементит в металлической основе, обычно имеет завышенную скорость V_l (рис. 5). Если цементит содержится в слое, важно знать его толщину. Измеряя скорость распространения поверхностной волны, проходящей через смесь серого и отбеленного чугуна, можно по ее величине сделать вывод о глубине отбеленного поверхностного слоя (рис. 6).

Для оценки литейных и механических свойств чугуна помимо информации о графите и структуре металлической основы необходимы также сведения о степени эвтектичности S_e и углеродном эквиваленте C_e . Степень эвтектичности рассчитывают по химическому

составу чугуна. В работе [10] выведено линейное регрессионное уравнение для серого чугуна: $S_e = 0,67 - 1,16 V_l$, коэффициент корреляции составляет 0,94. Коэффициент затухания ультразвука увеличивается с ростом S_e . Углеродный эквивалент C_e , характеризующий способность чугуна к графитизации, связан с V_l обратной пропорцией. Влияние содержания различных элементов химического состава на V_l наиболее полно изучено для ферритных ковких чугунов. В результате обработки экспериментальных данных была получена формула:

$$V_l = 4793 - 14 C + 42 Si - 20 Ni,$$

где V_l , м/с; C, Si и Ni — процентное содержание углерода, кремния и никеля, соответственно.

Уменьшение коэффициента затухания ультразвука с ростом содержания фосфора в сером чугуне отмечается в [11]. Влияние содержания фосфора в чугуне на скорость распространения продольной волны исследовано автором и приведено на рис. 7. Оно различно для чугуна с пластинчатым и шаровидным графитом, и, скорее всего, обусловлено для чугуна с пластинчатым графитом ликвацией фосфидов на границах

зерен и образованием цементита в фосфидной эвтектике, а для чугуна с шаровидным графитом — с частичным получением свободного углерода в пластинчатой форме вследствие расплавления при отжиге фосфидной эвтектики и кристаллизации графита через жидкий раствор.

УЗК механических свойств

В настоящее время существует возможность оценки ультразвуковым методом таких важных характеристик чугуна как модуль Юнга, прочность, твердость. Их связь с акустическими параметрами наиболее очевидно проявляется в выражении для расчета модуля Юнга через скорость продольной и поперечной V_t волн:

$$E = \rho V_t^2 (4V_t^2 - 3V_l^2) / (V_t^2 - V_l^2). \quad (1)$$

Погрешность определения модуля Юнга чугуна, рассчитанного по формуле (1), меняется от 4 до 10% [12]. Надежный УЗК механических свойств чугуна возможен в тех случаях, когда имеет место их зависимость от модуля Юнга. Это в первую очередь относится к временному сопротивлению при растяжении σ_B , определяемому на специальных разрывных образцах. В работе [13] указывается на наличие прямой пропорциональной зависимости σ_B от E и твердости чугуна HB :

$$\sigma_B = \alpha \times E \times HB, \quad (2)$$

где α — эмпирически определяемый коэффициент, который зависит от вида чугуна и технологии его получения. Если E непосредственно связан со скоростями волн по формуле (1), то твердость имеет опосредованную связь с акустическими параметрами и определяется в основном структурой металлической основы и в меньшей степени, чем модуль Юнга, параметрами графитных включений. В первых работах по изучению акустических свойств чугуна указывалось на наличие зависимости скорости ультразвука от σ_B . Например, в [12] приводится регрессионное уравнение для расчета σ_B серого чугуна:

$$\sigma_B = 0,227 V_l - 783. \quad (3)$$

Погрешность определения σ_B по формуле (3) составляет 14%. В этой же работе приводится еще один вариант расчета σ_B , в котором присутствуют V_l и HB :

$$\sigma_B = 0,16 V_l + 0,86 HB - 689. \quad (4)$$

Учет значения HB в (4) снижает погрешность в определении σ_B до 10%. Однако физически обоснованной зависимостью следует считать формулу:

$$\sigma_B = \alpha \times V_l^2 \times HB, \quad (5)$$

полученную из (2) с учетом (1).

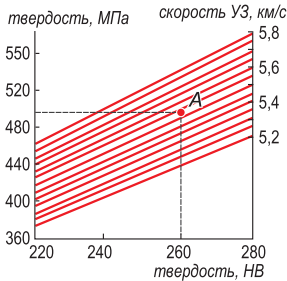


Рис. 8. Номограмма для определения прочности (временного сопротивления при растяжении) низколегированного чугуна с шаровидным графитом по твердости и скорости продольной волны

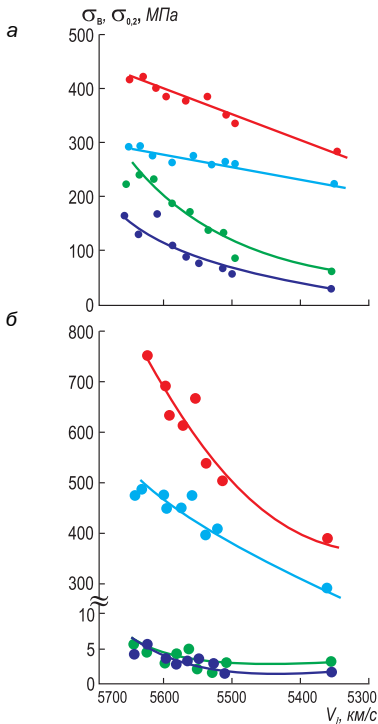


Рис. 9. Зависимости механических свойств ферритного (а) и перлитного (б) чугуна с шаровидным графитом от скорости продольной волны

На рис. 8 приведена номограмма для расчета σ_b по формуле (5). Определение σ_b было проведено автором на пяти различных заводах. Численные значения коэффициента α были разными на разных заводах: для чугуна с пластинчатым графитом $0,032 \div 0,077$, с шаровидным графитом $0,062 \div 0,114$. Погрешность определения σ_b не превышает 7%.

Использование другого акустического параметра — коэффициента затухания ультразвука — для оценки не нашло широкого распространения, так как погрешность определения σ_b в этом случае гораздо больше, чем по скорости V_l . Наряду с определением σ_b предпринимались попытки определения ультразвуковым методом предела упругости $\sigma_{0,2}$, относительного удлинения δ , ударной вязкости a_H чугуна. Полученные зависимости (рис. 9) вполне пригодны для оценок параметров механических свойств чугуна по скорости продольной волны, но на практике их используют только в особых случаях. Известна также зависимость скорости продольной волны и коэффициента затухания ультразвука от плотности серого чугуна и чугуна с шаровидным графитом рис. 10. Физически изменение плотности чугуна можно связать с изменением со-

держания графитных включений в металлической основе чугуна. Для чугуна марки СЧ-25 получено регрессионное уравнение связи твердости HB и скорости V_l , м/с: $HB = 0,04853 V_l - 57,4$.

По мнению автора, надежная связь твердости чугуна с его акустическими характеристиками существует не для всех видов чугуна и обнаруживается только экспериментальным путем. Для определения твердости чугуна представляет интерес использование такого акустического параметра, как частота максимальной амплитуды спектра первого донного сигнала [15]. Однако применение предложенного метода затруднено необходимостью использования дефектоскопа с анализатором спектра.

Таким образом, можно утверждать, что имеются широкие возможности исследования чугунных отливок ультразвуковым методом, реализация которых напрямую связана с состоянием чугунолитейной промышленности.

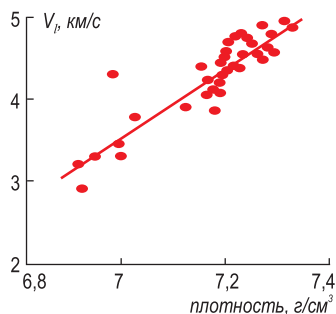


Рис. 10. Зависимость скорости продольной волны от плотности чугуна

Литература

1. Химченко Н. В., Приходько В. Н. Ультразвуковой контроль величины графитных включений в сером чугуне. — Заводская лаборатория. 1955. № 12. С. 1470–1488.
2. Ziegler R., Gertner R. Die Scallgereschwindigkeit als Keenzeichnend Grobe fur die Beurteilung von Gußeisen. — Gißerei. 1958. Bd 45. H. 10. S. 185–193.
3. Schmidt B., Sell B. Praxis der ultraschall Prufung zur Fehlerermittlung bei Gusseisen. — Giesserei. 1979. Bd 66. H. 19. S. 716–720.
4. Lavender J. D., Wright J. C. A new philosophy in the application of ultrasonic techniques in the foundry industry. — AFS Transactions. 1976. N 4. P. 155–168.
5. Воронкова Л. В. Ультразвуковой контроль чугунных отливок. — М.: 2001. — 40 с.
6. Соколов С. Я. Поглощение ультразвуковых колебаний твердыми телами. — ДАН СССР. 1948. Т. 59. С. 883–890.
7. Лепендин Л. Ф., Максимов В. Н. Определение формы графитовых включений в чугунных отливках акустическим методом. — Труды Таганрогского радиотехнического института/Прикладная акустика. 1971. Вып. 22. С. 264–269.
8. Ботаки А. А., Ульянов В. Л., Шарко А. В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. — М.: Машиностроение, 1983, — 78 с.
9. Bosque E. V. Encavo par ultrasnido aplicado a la verificación de la calidad en piezas de hierro fundido con grafito modular. — Foundeichon. 1986. V. 32. P. 13–15.

10. Falecki Z., Pyka M. Ocena ultradźwiękami struktury reliwa c zarego. — Przegląd odlewnictwa. 1986. V. 36. N 2. P. 75–78.
11. Tsutsumi N., Ohiwaki S., Oda T. Влияние фосфора на демпфирующие свойства серого чугуна. — Umono, J. Jap. Foundrymen Soc.. 1986. V. 58. N 6. P. 417–423.
12. Luca V. — Metallurgia. 1978. V. 30. N 9. P. 516–520.
13. Thum A., Ude H. — Giesserei. 1929. N. 16. S. 501–513.
14. Славина Л. Я., Попазов Д. Д., Москоуенко И. Б., Зуева С. А. Акустический контроль твердости заготовок из чугуна с помощью прибора «Звук». — Заводская лаборатория. 1994. № 6. С. 38–40.
15. Воронкова Л. В., Ермолов И. Н., Куликов В. И. — Дефектоскопия. 1985. № 3. С. 50–52.