



The problems of structure-and defectoscopy of cast irons by supersonic method are examined. The new principle schemas of ultrasonic measurings, constructions of acoustic transformers are presented and their analysis is carried out. The results of investigation of influence of graphite form on speed of ultrasound are given and also some peculiarities the surface und subsurface faults reveal by shadow way.

А. Р. БАЕВ, Г. Е. КОНОВАЛОВ, А. Л. МАЙОРОВ, М. В. АСАДЧАЯ, ИПФ НАН Беларуси,
М. А. ТИЩЕНКО, РУП «МАЗ»

УДК 621.179.16

МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕСПЛОШНОСТЕЙ И КОНТРОЛЬ СТРУКТУРЫ ЧУГУНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЪЕМНЫХ И ГОЛОВНЫХ ВОЛН

Современное машиностроительное производство невозможно представить без широкого использования чугунного литья, обладающего сравнительно низкой температурой плавления и хорошими литейными свойствами. При выплавке чугуна необходимо строгое соблюдение технических условий (ТУ) его производства, включая химический состав, распределение температуры по объему отливки, время проведения той или иной операции и др. [1]. Отклонения от ТУ (даже небольшие) в комплексе могут привести к выпуску партии отливок с негодной микроструктурой и физико-механическими свойствами. Однако в ряде случаев даже при получении отливок с требуемой микроструктурой велика вероятность их производства с дефектами типа пористости, раковин, трещин, расположенных в зоне механической обработки изделия.

Контроль структуры чугуна

На предприятиях Беларуси и стран СНГ (за редким исключением) контроль структуры чугуна осуществляется преимущественно разрушающими методами. При этом образцы чугуна, специальным образом вырезанные из отливки, испытываются на разрыв, твердость, а также производится металлография среза металла. Обладая в комплексе высокой информативностью, эти методы трудоемки и длительны. Кроме того, 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 металла в других, наиболее ответственных частях отливки, особенно, если отливка громоздкая и имеет сложный профиль. Достоверная оценка структуры чугунов методами неразрушающего контроля — весьма важная и перспективная производственная задача. Для этих целей могут быть

использованы методы, основанные, как правило, на корреляции между структурой чугуна и его упругими, магнитными и другими свойствами [2–5]: акусто-реверберационные; магнитные; ультразвуковые.

Акусто-реверберационные методы известны достаточно давно и основаны на анализе амплитуды и спектра свободных колебаний в изделии. По сути дела, это интегральные методы и предназначены, как правило, для контроля изделий, имеющих достаточно простую форму и геометрические размеры, превышающие некоторые минимальные. В качестве определяющих физических параметров, используемых при анализе структуры чугуна и существенно зависящих от нее, выступают декремент затухания и модуль упругости.

Магнитные методы (интегральные и локальные) основаны на анализе петли гистерезиса кривой намагничивания металла $B(H)$, где B — индукция, H — напряженность магнитного поля. Особенности взаимодействия магнитного поля с намагничиваемым объектом, включая, например, зависимость выходных параметров измерительной системы от формы контактной поверхности объекта (и размагничивающего фактора) и др., ограничивают использование метода, особенно при контроле крупногабаритной продукции. Эти методы весьма эффективны при контроле структуры мелких отливок на наличие в них отбела и отсера.

Ультразвуковой метод (как и акусто-реверберационный) основан на наличии взаимосвязи между структурой и свойствами чугуна упругими и диссипативными. Однако отличие заключается в том, что в качестве наиболее информативного параметра используется скорость УЗК C и (значительно реже) коэффициенты затухания и рассеяния упругих волн δ [5]. При этом упругие волны несут информацию о структуре металла именно в объеме их распространения, образующем своеобразный волновод. Использование сер-

висных устройств и оптимизация измерительных схем (как будет показано ниже) позволяют достаточно легко и оперативно производить ультразвуковое зондирование различных частей отливки.

Суть метода иллюстрируется на рис. 1, где приведены характерные зависимости, связывающие скорость УЗК с содержанием q и средним размером частиц шаровидного графита (ШГ) в чугуна [3, 5, 6]. Как видно из рисунка, при q 90% разница скоростей УЗК в образцах чугуна, полученных при варьировании некоторых технологических параметров, нивелируется. Отметим, что ультразвуковой метод весьма эффективен при структуроскопии больших партий чугуновых отливок, а также отливок сложного профиля. Этот метод широко применяется в странах дальнего зарубежья [7–9]. Подобные разработки используются на некоторых предприятиях России (ЗИЛ и КАМАЗ). Их работа основана, как правило, на принципе измерения скорости УЗК путем “прозвучивания” изделия в режиме “эхо”, что, как правило, используется для толщинометрии изделий [2]. При реализации же “теневое” варианта измерений (когда исследуемый металл находится между излучателем и приемником УЗК) предъявляются высокие требования к состоянию контактных поверхностей. Последние должны быть плоскопараллельны и тщательно зачищены. На наш взгляд, использование такой аппаратуры в реальных условиях производства отливок большой номенклатуры и сложной формы затруднительно, а в ряде случаев нерационально.

На базе РУП «МАЗ» была проведена работа по совершенствованию методик и адаптации средств ультразвуковых измерений применительно к контролю структуры высокопрочного чугуна в цеховых условиях. В результате предварительных исследований и испытаний были предложены следующие методы измерений (рис. 2): теневой импульсно-фазовый метод с одной фиксированной аку-

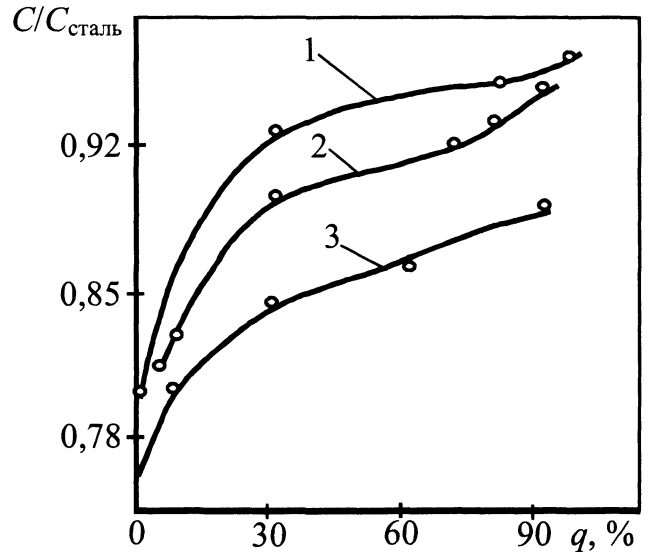


Рис. 1. Влияние содержания ШГ на скорость УЗК в чугуна: 1 – мелкий графит; 2 – средний; 3 – крупный

стической базой [2]; теневой импульсно-фазовый метод с несколькими фиксированными базами (рис. 2, а); амплитудно-угловой метод (рис. 2, б).

Теневой импульсно-фазовый метод с одной фиксированной акустической базой

Этот метод является достаточно простым и высокопроизводительным. Для его реализации сконструированы малозумящие высокочувствительные прямые преобразователи на мегагерцовый диапазон частот с хорошим акустическим согласованием при вводе УЗК в отливку, прошедшую дробеструйную обработку. Ввод УЗК может производиться и через поверхность с нанесенной грунтовкой. Дополнительная временная задержка τ , обусловленная прохождением зондирующего сигнала через контактные слои и электронный блок прибора, получается на основе статистических данных и вводится в программу автоматической обработки результатов измерений

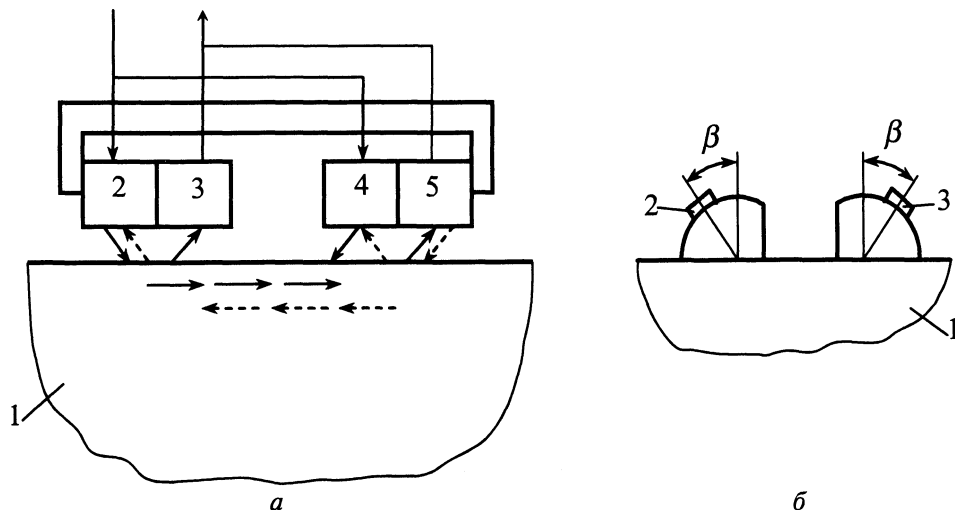


Рис. 2. Контроль структуры чугуна по измерению скорости звука (а) и угла ввода-приема УЗК β , соответствующего максимальной амплитуде зондирующего сигнала (б): а – 1 – отливка; 2–5 – наклонные преобразователи; б – 1 – отливка; 2, 3 – преобразователи с переменным углом ввода

прибора. При этом скорость ультразвуковых волн имеет устойчивую корреляционную связь с формой шаровидного графита и может быть определена по формуле:

$$C=L/(t' - \tau)=C/t,$$

где t' – суммарное время прохождения зондирующего сигнала по электроакустическому и акустическому тракту измерительной системы. С целью упрощения анализа результатов измерений на табло измерительного устройства выводится не значение скорости УЗК, а те граничные значения акустической базы (длины прозвучиваемой зоны металла), которым соответствует структура высокопрочного (нижнее значение $L_{вч}$) и серого (максимальное – $L_{сч}$) чугуна. Как показывают испытания, достоверность и надежность измерений t (а следовательно, и C) обеспечиваются с погрешностью не более 1%, когда $0,03 \text{ м} \leq L \leq 0,2$. (Подобная измерительная схема может быть использована и в том случае, когда требуется разбраковка серого чугуна по маркам, что будет показано ниже.) Необходимо отметить, что в тех случаях, когда отсутствует возможность реализации теневого (классического) варианта измерений, предлагаются другие измерительные схемы, приведенные на рис. 2.

Теневой импульсно-фазовый метод с несколькими фиксированными базами

На отливку 1 (рис. 2, а) устанавливают акустический блок, содержащий четыре (2–5) или три ультразвуковых преобразователя, которые удерживаются в фиксированном положении с помощью магнитной системы прижима (не показано). Схема измерений симметричная. Причем расстояние между 2-м и 4-м преобразователями L_{24} устанавливается равным (с высокой точностью) расстоянию L_{13} между 1-м и 3-м преобразователями. Полагают, что $2L=L_{24}+L_{13}$. С целью существенного снижения погрешностей, вызванных дифракцией, на преобразователях 2 и 3 установлены звукопроводы, выполняющие функцию линии задержки с характерными временами задержки τ_2 и τ_3 ($\tau_2 \approx \tau_3$). Измерение времени прохождения зондирующего импульса осуществляется сначала по схеме $1 \rightarrow \{2 \text{ и } 4\}$, а затем по схеме $4 \rightarrow \{3 \text{ и } 1\}$, т.е. сначала преобразователь 2 излучает импульсы, а преобразователи 2 и 4 принимают их через характерные временные интервалы t_{12} и t_{14} . Затем преобразователь 4 излучает, а преобразователи 3 и 1 принимают импульсы через временные интервалы t_{43} и t_{41} соответственно. Для этого случая скорость УЗК определяют по формуле

$$C=(2L+\Delta L)/(t_{14}+t_{41}+\Delta t-t_{12}-t_{43}-\tau_2-\tau_3+\tau_d), \quad (1)$$

где ΔL и Δt – учитываемые поправки, обусловленные, как правило, температурным фактором; τ_d – дополнительная задержка, оказывающая существенное влияние на точностные параметры

измерительной системы и обусловленная состоянием и геометрией контактных переходных слоев между преобразователями и объектом. Использование предложенной схемы позволяет в десятки раз снизить влияние неровностей контактной поверхности изделия на погрешности измерений и в ряде случаев обеспечить измерение изменений скорости УЗК в материале $\sim 10^{-4}$.

Рассмотрим наиболее неблагоприятную ситуацию для измерений, когда между рабочей поверхностью акустического устройства и объектом имеется звукопроводный клин с углом

$$\alpha \approx \arcsin[\Delta h/(L+l)],$$

где $\Delta h=h_1-h_2$; l – расстояние между точками выхода двух соседних преобразователей (между 2-м и 3-м либо 4-м и 5-м); h_1 и h_2 – соответственно расстояние между точкой выхода 2-го и 5-го преобразователей до поверхности объекта. Как легко показать, при $\Delta h=0$ наличие параллельной звукопроводящей прослойки, образующей дополнительную акустическую задержку, не окажет влияние на результаты измерений, поскольку и при этом происходит одинаковое по величине и направлению смещение как точки ввода акустического луча в изделие, так и точки выхода из него. Если же прослойка имеет форму клина и $\Delta h>0$, $h/L \ll 1$, то изменение временного интервала, обусловленного прохождением звука по жидкой задержке и в чугуне, будет отрицательным, причем

$$\tau_{d1} \approx -\Delta h \{ [C_{ж} \arcsin(C_{ж}/C_n)]^{-1} - \text{tg}\{\arcsin(C_{ж}/C_n)\}/C_n \}^{-1}, \quad (2)$$

где $C_{ж}$, C_n , $C_ч$ – соответственно скорости УЗК в контактной жидкости, призме преобразователя и чугуне. При прозвучивании объекта в обратном направлении дополнительная задержка τ_{d1} имеет обратный знак и точно такую же величину, т.е. $\tau_d = \tau_{d1} + \tau_{d2} = 0$.

Принципиально можно использовать трехщуповую систему прозвучивания изделия (несколько упрощая электронную схему), однако при этом требуется проводить два измерения, поворачивая устройство на 180° .

Необходимо отметить, что указанная выше схема может быть использована и при контроле отливок с цилиндрической контактной поверхностью, имеющих радиус кривизны $R \approx (2-3) \cdot 10^{-2}$ м и более. Кроме того, благодаря высоким точностным характеристикам схема (рис. 2, а) может быть положена в основу метода толщинометрии полых отливок чугуна с неизвестной структурой.

Амплитудно-угловой метод

В ряде случаев, когда контактная поверхность изделия достаточно ровная и τ_d мало, может быть использована двухщуповая схема прозвучивания изделия (рис. 2, б). При этом скорость УЗК в чугуне определяется по амплитудным параметрам сигнала, а не по фазовым. Эта схема менее точная

(погрешность измерений 2–3%), однако значительно проще и компактнее. При этом контактная поверхность отливки может быть плоской или цилиндрической с радиусом кривизны до 1 см, длина — до 4 см, а ширина — до 1 см. Процедура измерений поясняется на рис. 2–4 и заключается в том, что, изменяя положения преобразователей на призме, определяют критический угол наклона акустических осей преобразователей β^* :

$$\beta^* \approx \arcsin C_{\text{п}}/C,$$

для которого наблюдается максимум зондирующего сигнала головной волны P_A (поперечной или продольной). На рис. 3 показано, как зависит амплитуда головной волны от угла наклона призмы преобразователя. Установлено, что наибольшая точность измерений достигается при настройке системы на первый критический угол. Так, скорость продольных волн в чугунах в зависимости от его структуры изменяется от 3100 до 6300 м/с. Соответственно изменяется и β^* (рис. 4). Опытные испытания этой методики показывают, что таким способом можно достаточно просто и оперативно отбраковать серый чугун от высокопрочного. Однако этот метод можно считать дополнительным, поскольку, как указывалось выше, на его точностные характеристики существенно влияет микро- и макрорельеф поверхности.

Одним из необходимых этапов по внедрению ультразвукового метода контроля структуры чугуна в производство на предприятии является установление корреляционной зависимости между скоростью УЗК и содержанием графитовых включений данной формы и размеров. Причем величина этих граничных значений скорости УЗК C^* может различаться на несколько процентов в зависимости от специфики конкретного производства. Интересно, что полученные нами данные для значений C^* неплохо соотносятся с численными данными, приведенными в работе [5]. Испытания данного устройства на РУП «МАЗ» позволили установить корреляционные зависимости между параметрами скорости УЗК и формой графитовых включений; при этом нижняя граница значений C^* для чугуна с шаровидной формой графитовых включений ≈ 5550 м/с.

Предварительные исследования, проведенные на образцах серого чугуна, произведенного на ОАО «МЗОО» и РУП «Гомельский литейный завод «Центролит», показали существенную зависимость между скоростью УЗК и прочностью (на разрыв) серого чугуна. В частности, при изменении марки чугуна с СЧ10 до СЧ20 скорость изменяется от 3700–3800 до 4200 м/с и выше (рис. 5).

Верхняя же граница C^* для серого чугуна, установленная с учетом не только данных наших исследований, но и других источников [5], соответствует величине $C^* \approx 4900$ м/с. Причем это значение получено при измерениях на отливках, соответствующих высококачественному (высоко-

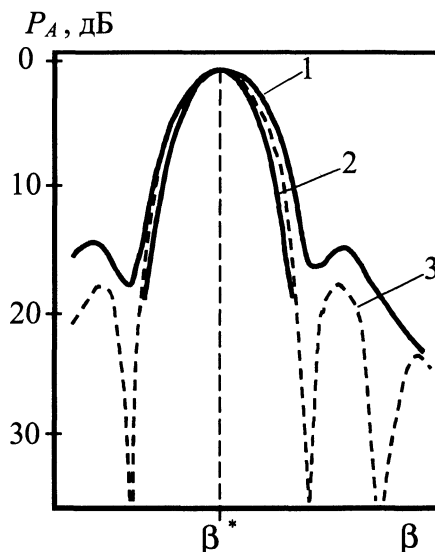


Рис. 3. Амплитуда подповерхностных волн при изменении угла падения β в окрестности его критического значения. Мода: 1 — продольная; 2 — поперечная; 3 — теория

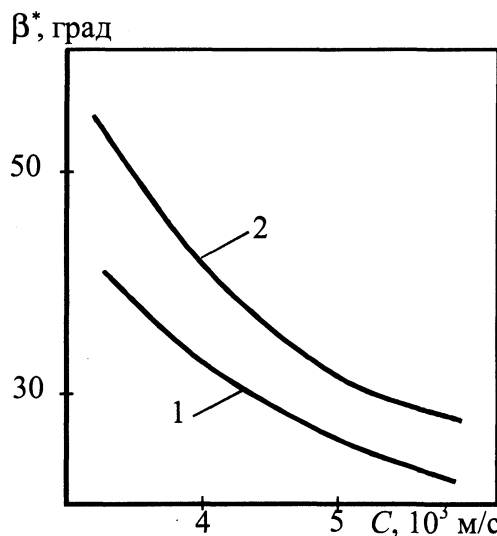


Рис. 4. Первый критический угол β^* в зависимости от скорости ультразвука в чугуне. Скорость УЗК в призме $C_{\text{п}}$: 1 — 10^3 м/с = 2,73; 2 — 2,2

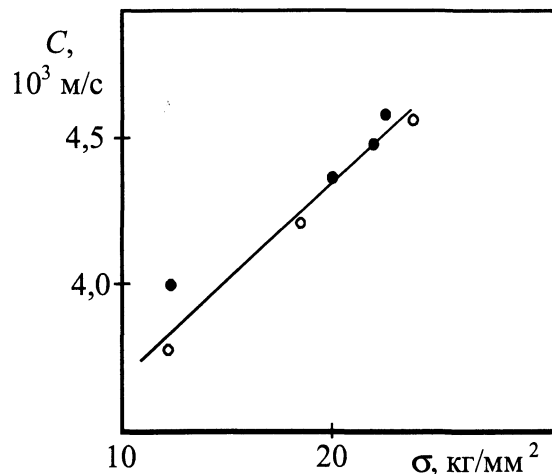


Рис. 5. Зависимость скорости УЗК от прочности серого чугуна на разрыв: \circ — наши данные; \bullet — данные [5]

марочному) серому чугуну, производимому электроплавильным способом.

Выявление несплошностей в отливках ультразвуковым методом

Одной из главных задач производства изделий из отливок чугуна является неразрушающий контроль поверхностных и подповерхностных дефектов, лежащих в зоне чистовой обработки изделия. Необходимо отметить, что дефектоскопия изделий из серого чугуна имеет определенную специфику по сравнению с высокопрочным и ковким чугунами. Так, в сером чугуне с уменьшением его марки возрастает затухание УЗК; скорость же продольных волн достигает 3200 м/с, а поперечных и рэлеевских – 1300–1400 м/с. Это существенно ограничивает использование традиционных методов и средств неразрушающего контроля [2, 5] глубины проникновения дефекта внутрь отливки. Если дефект достаточно глубок, то его можно определить с помощью зеркально-теневого метода. Если же глубина поверхностного дефекта (газовой пористости, трещины) не превышает 10–15 мм и требуется высокая точность контроля, то зеркально-теневого метод не подходит.

С помощью рассмотренного ниже метода представляется возможным выявлять трещины (или другие поверхностные дефекты) и определять их глубину как на плоской поверхности отливки, так и в цилиндрических каналах (рис. 6). Часто трудности в их обнаружении обусловлены прежде всего наличием наплыва над трещиной; отличием структуры чугуна в этой зоне; шероховатостью поверхности. В силу указанных причин неэффективно применение традиционных методов контроля: токовихревого, магнитостатического, электромагнитного и др. Используя представления лучевой акустики для приведенной на рис. 6 схемы измерений, получаем выражение, связывающее время распространения зондирующего сигнала τ и глубины трещины, расположенной внутри цилиндрического канала:

$$\tau - \tau_0 = \{S_1 + S_2 - R(\varphi_1 + \varphi_2)\} / C + \Delta\tau, \quad (3)$$

где $\tau = \tau_0$ при $h=0$; $S_i = [(h+R)^2 + R^2 - 2R\cos\varphi_i(R+h)]$ – расстояние от точки выхода акустического луча i -го преобразователя до вершины трещины; $\Delta\tau$ – временная поправка, учитывающая искривление контактной поверхности. Формула (3) примени-

ма для случая, когда $S/R \geq \text{tg}\varphi$; при этом $R\sin\varphi_1 = a$, $a\sin\varphi_2 = b$. Если $R \rightarrow \infty$, то с достаточной для практики точностью ($\sim 10\%$ при глубине трещины $h > 3-4$ мм и $a/R \ll 1$) временной интервал τ прохождения зондирующего сигнала в области звукового канала может быть определен как:

$$\tau = \tau_{3A} + \tau_{3П} + \left\{ a \left(\sqrt{1 + \frac{h^2}{a^2}} - 1 \right) + b \left(\sqrt{1 + \frac{h^2}{b^2}} - 1 \right) \right\} C^{-1}, \quad (4)$$

где τ_{3A} и $\tau_{3П}$ – соответственно времена распространения зондирующего сигнала в акустических задержках призм преобразователей и контактных слоях. С целью устранения влияния нестабильности качества акустического контакта на точность измерения τ предложено применять трех- или четырехщуповую измерительные схемы, подобные представленной на рис. 2, а.

Основные закономерности прохождения дифрагированной на трещине волны представлены на рис. 7. Как видно из рисунка и формул (3) и (4), наибольшая чувствительность измерений реализуется при наименьшей акустической базе прозвучивания. Причем о глубине трещины можно судить как по изменению амплитуды волны, так и по изменению фазовой скорости. Если акустическая база L постоянная, то максимальная чувствительность измерений (как по ослаблению сигнала, так и по временной задержке) реализуется при асимметричном смещении преобразователей относительно плоскости трещины. Причем оптимальное значение угла ввода, при котором достигается максимальная чувствительность к изменению h , зависит от расстояния между преобразователями, угла призмы, радиуса кривизны изделия. Необходимо отметить, что с увеличением глубины трещины при некотором $h > h^*$ наблюдается уменьшение угла падения, соответствующего максимуму амплитуды зондирующего сигнала.

Наличие контактной смазки или жидкого загрязнения, проникшего в поверхностную трещину, приводит к уменьшению отражающей

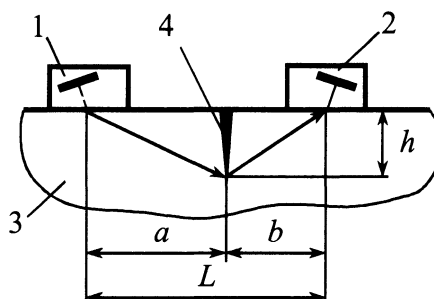
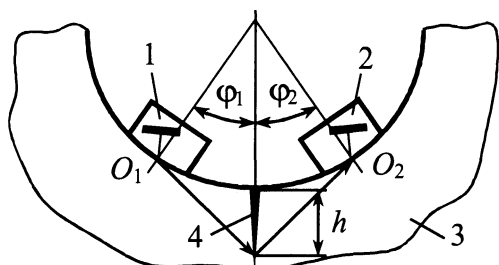


Рис. 6. Пояснения к методу обнаружения трещин и других несплошностей в чугуне и измерения их глубины: 1, 2 – преобразователи; 3 – отливка; 4 – трещина

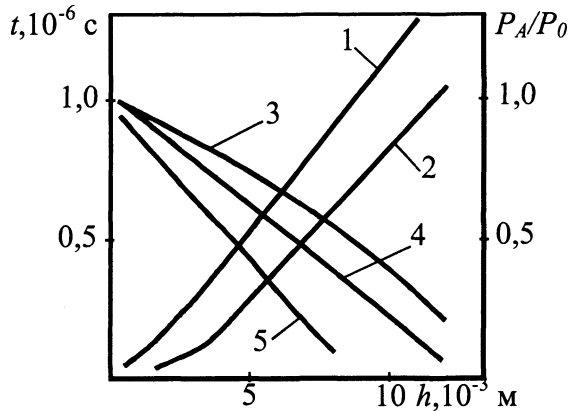


Рис. 7. Зависимость времени (1, 2) и амплитуды головной волны (3–5) от глубины трещины: 1, 3 – L , 10^{-3} м = 20; 2, 4 – 40; 3 – 15; R , 10^{-3} м = ∞ (1–4); 40 (5)

способности трещины, а, следовательно, к снижению чувствительности измерений. Поэтому оптимальной для выявления трещин в исследуемых объектах является схема “перекрестного прозвучивания”. Как следует из экспериментальных данных, амплитуда зондирующего сигнала дополнительно ослабляется на 8–12 дБ с увеличением угла между плоскостью падения УЗК и плоско-

стью трещины от нуля до 50° . При этом достигается оптимальная чувствительность акустической измерительной схемы к индикации трещин (или других несплошностей) глубиной 3–4 мм и более.

Литература

1. Гуляев А.П. *Металловедение*. М.:Металлургия, 1986.
2. *Приборы неразрушающего контроля материалов и изделий: Справ. / Под ред. В.В.Клюева*. М.: Машиностроение, 1986.
3. Иванушкин П. Н. *Неразрушающий контроль чугуна*. Киев: Наукова думка, 1983.
4. Крауткремер Й., Крауткремер Г. *Ультразвуковой контроль*. М.: Машиностроение, 1991.
5. Воронкова Л. П. *Ультразвуковой контроль чугуна*. М.: ЦНИИМАШ, 1996.
6. Papadakis E. P., Bartosiewicz L., Chapman G. B. In *Trans. Amer. Foundrymens Soc. Proc. 87th Annu. Meet.*, Apr. 10–15. 1983. Vol. 91. Des Plaines. P. 111, 1983, 721–728.
7. Debej J. *Vyuziti Kontrolu tvaru grafitu pomoci ultrazvuku // Slevarenstvi*. 1985. Vol. 33. N. 11. S. 442–444.
8. Emerson N. J. *Asvantages is Automating ultrasonic testing of Iron Casting in the Foundry // Foundry trade Journal*. 1985. Vol. 158. P. 357–364.
9. Blower M. *Semiautomatic ultrasonic work station improves reability of testing // Foundryman*. 1991. Vol. 84. N. 11. P. 448–449.