

**ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДИКАТОРОВ СТРУКТУРЫ  
ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ТИПА ИЧ В УСЛОВИЯХ  
ПРОИЗВОДСТВА**  
*EXPERIENCE OF USE OF INDICATORS OF HIGH-STRENGTH CAST IRON  
STRUCTURE OF ИЧ-TYPE IN REQUIREMENTS OF MANUFACTURE*

*Баев А.Р., Коновалов Г.Е., Майоров А.Л., Парадинец В.В.  
Baev A.R., Konovalov G.E., Mayorov A.L., Paradinets V.V.*

Рассмотрена практическая реализация ультразвукового метода контроля структуры отливок из высокопрочного чугуна специальным прибором "Индикатор высокопрочного чугуна ИЧ-21". Рассмотрены базовые принципы лежащие в основе работы индикатора. Обобщен опыт использования индикатора ИЧ-21 в условиях литейного производства. Показано, что индикатор может быть использован для 100% контроля изделий в состоянии отливки без привлечения высококвалифицированного персонала. Индикатор ИЧ 21 может быть использован как при производстве чугуна, так и при входном контроле ответственных деталей. Кроме того, индикатор может быть использован при автоматизированном контроле.

*Practical realization of a method of an ultrasonic quality testing of high-strength iron casting structure by using the special device "The Indicator of high-strength cast iron ИЧ-21" is considered. Base principles underlying in operations of the indicator are analyzed. Experience of use of indicator ИЧ-21 in requirements of foundry manufacture is generalized. It is shown, that the indicator can be used for 100 % testing of products in a state of casting without attraction of the highly skilled personnel. Indicator ИЧ-21 can be used both by manufacture of cast iron, and at the input test of critical parts. Besides, the indicator can be used at the automated testing.*

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 в значительной степени повысило 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 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, 3]. Это вызывает необходимость проведения исследований структуры полученного чугуна после каждой плавки. В подавляющем большинстве случаев на предприятиях контроль структуры чугуна осуществляется, преимущественно, разрушающими методами, включая металлографию, испытания на разрыв, твердость, и другие. При высокой информативности эти методы трудоемки и длительны. Кроме того, следует учитывать, что поскольку взятие пробы производится локально из определенной части отливки (например, из литника), далеко не всегда по результатам исследований представляется возможным судить о структуре и физико-механических свойствах отливок во всем объеме. В особенности это касается заготовок, имеющих сложную форму и большую разницу в толщинах в разных частях отливки.

Известно немало попыток применения неразрушающих методов к контролю структуры 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 используется декремент затухания  $\Delta$ , обусловленный поглощением и рассеянием упругих волн на микро-неоднородностях 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. Наличие на поверхности отливки отбела может стать фатальным для таких измерений.

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 пара-

метров распространения упругих волн от структуры чугуна (формы графитовых включений и материала основы) [4, 5, 6]. 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 приведены зависимости скорости продольных волн от процентного содержания шаровидного графита в чугуне. Данные зависимости имеют одинаковую характерную форму для 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 шаровидного графита больше, тем меньше

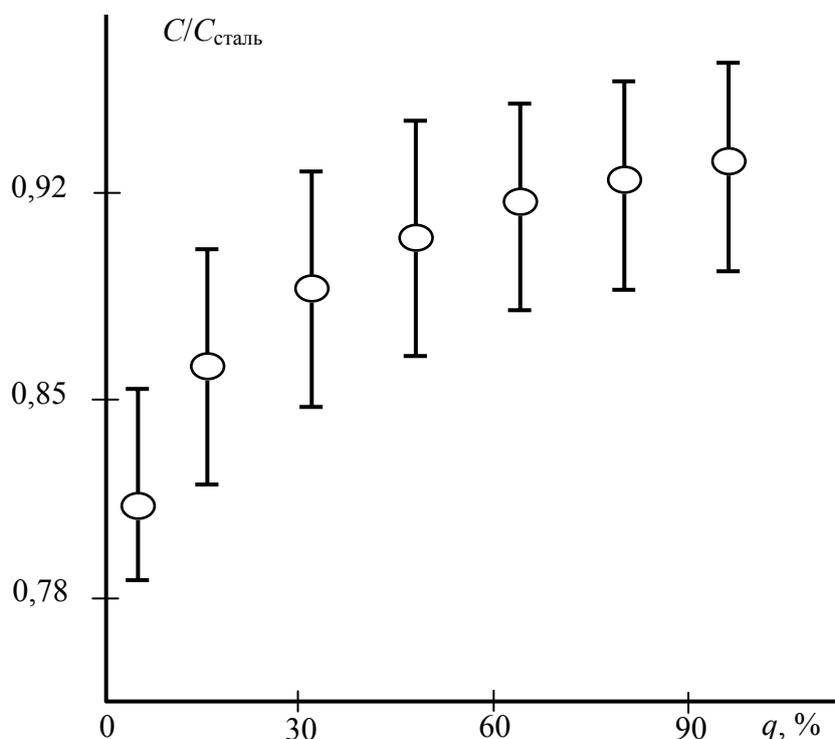


Рис. 1. Влияние содержания шаровидного графита на скорость продольной упругой волны в чугуне: верхняя граница соответствует мелким по размеру графитовым включениям, нижняя - крупным.

затухание. Однако, измерение затухания более сложная процедура, чем измерение скорости и, соответственно, результаты таких измере-

ний 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 может быть: феррит, феррит с перлитом и перлит. По нашим измерениям, чугуны с перлитной основой имеют скорость продольной упругой волны на  $\sim (5-7)\%$  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 измерений 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.

Важной характеристикой высокопрочного чугуна является 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 по-

строения 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, даже, 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



Рис. 2. Индикатор высокопрочного чугуна ИЧ-21

графита. То есть, 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 оперативной проверки чугуна: возможность проведения измерений непосредственно в условиях литейного производ-

ства; 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 настоящее время выпускается версия ИЧ-21 (рис. 2).

В качестве основной схемы измерений был принят теневой метод, то есть когда анализируемая область размещается между преобразователями (рис. 3). Общая методология измерений построена на сравнении истинного размера отливки (измеренного, например, штангенциркулем (рис. 4) 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.

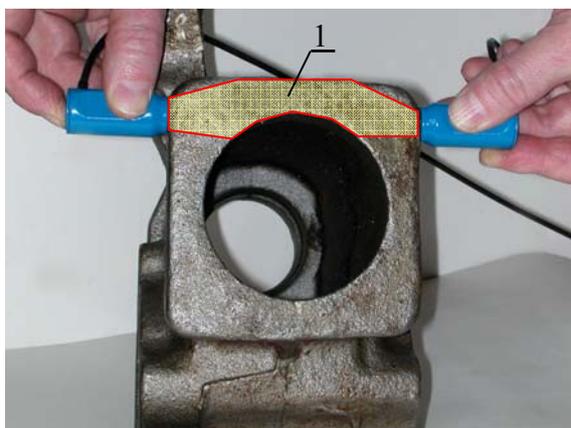


Рис. 3. Теневая схема контроля:  
1- контролируемая область



Рис. 4. Измерение размера

Для определения граничных зависимостей скоростей звука для серого и высокопрочного чугуна 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, установлено, 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  $\sim 4900$  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 необходимо получить акустический импульс с крутовозрастающей амплитудой. Для этого необходимо 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  $R_z 40$  преобразователи 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. 5 представлен пример полученной информации. Если истинное значение больше (равно) значения указанного в правой части индикатора (на рис. 5, в качестве примера, это значение равно 23,2 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 20,3 мм), то данная отливка выполнена из серого чугуна. Истинное расстояние между поверхностями, измеренное штангенцир-

кулем, может оказаться в интервале между значениями указанными на индикаторе (например, 21,5 мм). Такая область обозначена на индикаторе как <<?>> (см. рис. 5). Это значит, что в отливке произошла только частичная сфероидизация графита. То есть, в обследуемой части отливки присутствует как сферический, так и хлопьевидный графит.

Предусмотрено два режима работы индикатора: при первом режиме оператор сравнивает расстояние между поверхностями отливки, на которые устанавливаются 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.

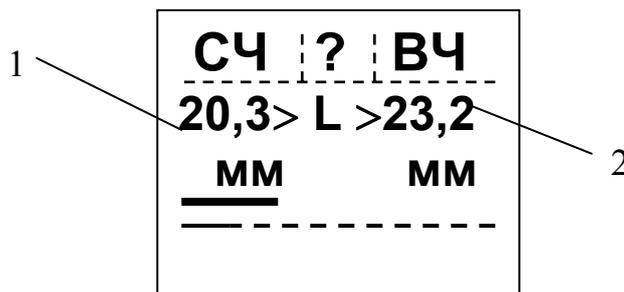


Рис. 5. Внешний вид результата контроля:  
1 - максимальное граничное значение для серого чугуна; 2 - максимальное граничное значение для высокопрочного чугуна

Варианты представления информации при использовании второго режима контроля представлены на рис. 6.

В данном примере все отливки имеют реальное расстояние между поверхностями, на которых устанавливались датчики  $L = 24,9$  мм (позиция отображается в верхней части ЖКИ). На рис. 6а представлен результат контроля отливки, в которой не по всему объему сформировалась структура ВЧШГ и имеются области СЧ. Об этом информирует вопросительный знак на ЖКИ и включающийся в результате контроля красный светодиод.

На рис. 6б представлены результаты контроля отливки того же размера, но из серого чугуна. В этом случае измеренное индикатором значение в левой части ЖКИ (29,7 мм) больше чем реальный размер

отливки (24,9 мм). При этом на ЖКИ выводятся буквы СЧ и включается красный светодиод.

На рис. 6в представлены результаты контроля отливки того же размера, но из ВЧШГ. В этом случае измеренное индикатором значение в правой части ЖКИ (24,2 мм) меньше, чем реальный размер отливки (24,9 мм). При этом на ЖКИ выводятся буквы ВЧ и включается зеленый светодиод.

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.

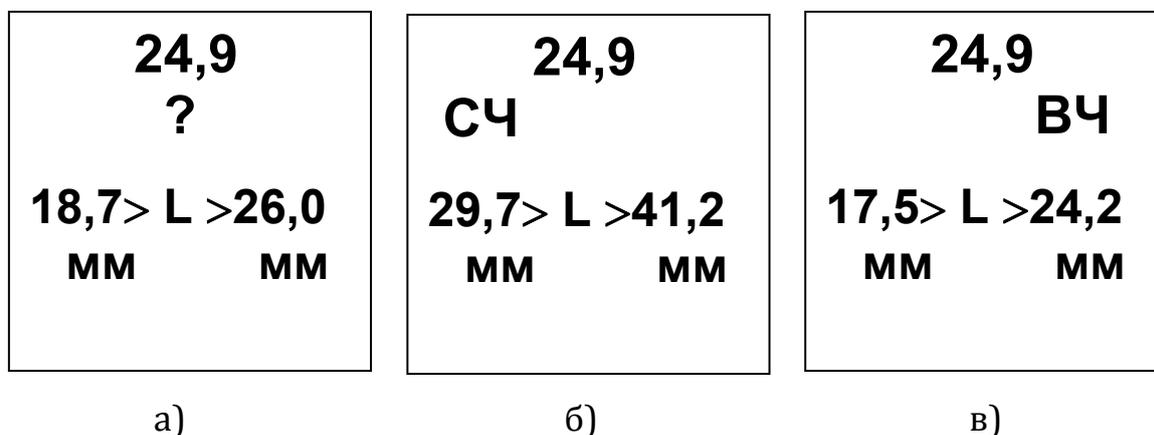


Рис. 6

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 сто процентов продукции, так как контроль занимает всего несколько секунд на измерение. Часто возникает необходимость контроля тонкостенных изделий. К настоящему времени аппаратно уже решены вопросы контроля отливок с толщиной стенки до ~5мм.

Для ряда изделий интерес представляет контроль при одностороннем доступе. Обычно это связано с ограниченным доступом к одной из поверхностей. Известны попытки использования для этих це-

лей магнитных методов. Их общим недостатком является локальность - недостаточное проникновение магнитного поля вглубь материала. Так как известно, что поверхность чугуновой отливки, особенно больших размеров и со значительными перепадами толщин может иметь вблизи поверхности структуру отличную от внутренней. В этом случае магнитные методы не могут дать истинной информации о степени сфероидизации графита. Кроме того, в ряде случаев, требуется обработка поверхности, для того чтобы провести достоверные измерения.

Нами были проведены исследования направленные на разработку средств контроля при одностороннем доступе. Для конкретной конфигурации отливки вопрос решается достаточно просто. Необходимо разработать конкретный датчик для данной отливки и поменять служебные настройки прибора (программное обеспечение). Сложнее обстоят дела при создании универсального измерительного средства. Это связано с условиями формирования соответствующей диаграммы направленности преобразователей и фазовыми изменениями сигнала на границах отражения.

К настоящему времени разработана конструкция специализированного датчика и соответствующее программное обеспечение для контроля при одностороннем доступе. При этом, максимальная толщина изделия в направлении прозвучивания для используемого датчика не должна превышать ~70мм для серого чугуна. Высокопрочные чугуны прозвучиваются лучше, так как затухание в них значительно меньше. Этот факт тоже может служить признаком высокопрочного чугуна. То есть, если на больших толщинах сигнал отсутствует, то это либо серый чугун, либо в отливке присутствуют значительные дефекты, приводящие к рассеянию. Кроме того, необходимо обеспечить точное измерение толщины стенки и следить за качеством отражающей поверхности. Чем меньше измеряемое расстояние, тем выше вероятность ошибки, вызванной фазовыми искажениями сигнала на поверхности отражения. Но, как показывает опыт, всегда можно найти необходимые корреляционные коэффициенты, которые позволяют с уверенностью производить разделение чугуновых отливок по степени сфероидизации графита.

В качестве развития задачи контроля при одностороннем доступе было разработано оборудование для контроля цилиндрических

изделий с наружной стороны без необходимости измерения толщины стенки. Данная задача была решена специально для изделий с ограниченным доступом к внутренней поверхности. В этом случае отсутствуют специальные требования к качеству внутренней поверхности. Базовой величиной, по которой ведется отбраковка, является внешний диаметр отливки.

**Опыт применения индикаторов в промышленности показывает:**

1. Предложенный метод и оборудование (индикатор высокопрочного чугуна серии ИЧ) позволяют проводить сто процентный контроль продукции в условиях литейного производства.

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

3. Использование индикатора позволяет отказаться как от интегральной оценки структуры чугуна в отливке (акустический метод и некоторые магнитные методы), так и от контроля по отдельным локальным точкам (микромагнитные методы и т.д.), а проверять ответственные сечения.

4. Индикатор может использоваться как при производстве высокопрочного чугуна, так и при входном контроле, причем не выборочном, а всего объема изделия.

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, 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 типа ИЧ позволяет проводить контроль всей продукции. Набранная статистика показывает соответствие результатов, полученных с помощью индикатора с результатами традиционных методов исследования.

### Литература

1. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
2. Неижко И.Г. О теориях образования шаровидного графита в чугунах. Сб. Кристаллизация, структурообразование и свойства модифицированного чугуна. Киев, ИПЛ АН УССР, 1981. С. 11-27
3. Неижко И.Г. Графитизация и свойства чугуна. Киев, Наукова думка, 1989.-202 с., с илл.
4. Воронкова Л.В. Ультразвуковой контроль чугунных отливок.- М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998, 40с.
5. Иванушкин Е.С. Оценка механических свойств высокопрочного чугуна в отливках ультразвуковым методом / Е.С. Иванушкин // Литейное производство. 1988 - №8. - С. 11-12.
6. Попов М.А. Ультразвуковой контроль механических свойств высокопрочного и серого чугунов / М.А. Попов, О.В. Чигогидзе // Литейное производство. 1977. - №2. - С. 30-31

*Статья поступила в редакцию 26.04.11*