



*The recommendations on application of technical means of control are given.*

С. Г. САНДОМИРСКИЙ, ИМИНМАШ НАН Беларуси

УДК 620.179.14

## ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК (обзор)

Чугун — один из наиболее используемых в качестве литейного сплава технологических материалов. Преимуществами чугуна являются простой и дешевый процесс получения отливок сложной формы (хорошая жидкотекучесть), высокая износостойкость (вследствие собственного смазывающего действия и повышения прочности пленки смазки) и хорошая обрабатываемость резанием (входящий в состав чугуна графит делает стружку ломкой). Промышленные чугуны [1–3] — это многокомпонентные железные сплавы с высоким содержанием углерода (более 2,14%) и кремния (базовые компоненты чугуна). Легирующими элементами, специально вводимыми для регулировки структуры и свойств чугуна, являются никель, хром, алюминий, медь и др. Улучшение свойств чугуна достигается при большом содержании легирующих элементов. Кроме химического состава, определяющее значение на свойства отливок оказывает его фазовый состав, формирующийся при затвердевании расплава.

Если при затвердевании жидкая фаза полностью переходит в смесь аустенита (твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе с предельной растворимостью углерода 2,14%) и графита, чугун называют серым — по цвету излома, определяемому наличием темных кристаллов графита. В сером чугуне углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в виде графитовых включений. Если образование графита исключается, то формируется смесь аустенита и цементита (химическое соединение железа с углеродом — карбид железа  $Fe_3C$  с содержанием углерода 6,67%) и чугун называется белым — по цвету светлых кристаллов цементита на изломе. Белый чугун вследствие присутствия в нем цементита обладает высокой твердостью (HB 400–500), хрупок (относительное удлинение  $\delta=0,01\%$ ) и практически не поддается обработке резанием.

Получил распространение как износостойкий материал. Если при кристаллизации образуются и цементит, и графит, чугун называют половинчатым. Он содержит структурные составляющие серого и белого чугуна: перлит (феррито-цементитная структура, образующаяся при распаде аустенита), пластинчатый графит и участки ледебурита (образование из аустенита и цементита). Эти структуры чугуна могут образовываться в одной отливке в зависимости от условий охлаждения различных ее участков — ускоренно охлажденная зона имеет структуру белого чугуна, медленно охлажденная — серого.

Отбеленными называют чугунные отливки, в которых поверхностные слои имеют структуру белого или половинчатого чугуна, а сердцевина — серого чугуна. Отбел на некоторую глубину возникает в связи с быстрым охлаждением поверхности в результате литья в металлическую или песчаную форму. Высокая твердость поверхности обеспечивает хорошую сопротивляемость против износа. Поэтому из отбеленного чугуна изготавливают прокатные валки, колеса, шары для мельниц.

По строению металлической основы, которая также определяется скоростью охлаждения чугуна и степенью распада цементита, чугуны разделяют на:

1. Ферритный чугун. Металлической основой является феррит (твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе с предельной растворимостью углерода 0,1%), а практически весь углерод находится в форме графитовых включений.

2. Перлитный чугун. Содержит часть углерода в связанном состоянии в виде цементита в перлите, а остальную часть — в виде графитовых включений.

3. Феррито-перлитный чугун. Образуется, если при охлаждении чугуна выделяется вторичный

графит, а распад аустенита частично происходит на феррит и графит, а частично на феррит и цементит.

4. Перлитно-цементитный чугун, как и перлитный, образуется при ускоренном охлаждении.

Большое влияние на механические свойства чугуна оказывает форма выделяющихся графитовых включений, которые можно рассматривать как надрезы, ослабляющие металлическую основу структуры. Чем мельче графитовые включения, чем меньше их и больше степень изолированности друг от друга, тем выше прочность чугуна. В зависимости от формы графита и условий его образования различают следующие группы чугунов: серый, ковкий и высокопрочный с шаровидным графитом.

В сером чугуне графит обычно выделяется в виде пластинчатых включений. Пластинки графита уменьшают сопротивление отрыву, предел прочности и особенно пластичность чугуна (при растяжении серого чугуна независимо от свойств металлической основы  $\delta \leq 0,5$ ). Графитовые включения мало влияют на снижение предела прочности при сжатии и твердости (НВ 143–255), величина которых определяется главным образом структурой металлической основы чугуна. Нарушая сплошность металлической основы, графит делает чугун малочувствительным к внешним концентраторам напряжений (дефектам, надрезам). Вследствие этого серый чугун имеет практически одинаковую конструкционную прочность в отливках простой формы и с ровной поверхностью и сложной формы с надрезом или плохо обработанной поверхностью. Наибольшую прочность и износостойкость обеспечивает перлитная структура металлической основы серого чугуна. Такой чугун используют для изготовления станин мощных станков и механизмов, деталей, работающих на износ в условиях больших давлений.

Ковкий чугун получают длительным отжигом отливок из белого чугуна. На первой стадии отжига (при 950–970°) в результате распада цементита диффузионным путем происходит образование хлопьевидного графита. Затем отливки охлаждают до температур 760–720° (при этом происходит выделение из аустенита вторичного цементита, его распад и рост графитных включений) и дают длительную (24–60 ч) выдержку. Происходит распад аустенита с образованием феррито-графитовой структуры или распад цементита, входящего в состав структуры перлита, с образованием феррита и графита. После окончания второй стадии графитизации структура чугуна состоит из феррита и хлопьевидного графита. Такой графит по сравнению с пластинчатым меньше снижает прочность и пластичность металлической основы чугуна. Ферритные ковкие чугуны используют для изготовления деталей,

эксплуатируемых при высоких динамических и статических нагрузках. Благодаря высокой пластичности ( $\delta=6-20\%$ ) и низкой твердости (НВ 163) ферритному ковкому чугуну в наибольшей степени свойственна хорошая обрабатываемость резанием.

При ускоренной скорости охлаждения образуется перлитный ковкий чугун, имеющий светлый излом, высокую прочность (НВ 241–269), умеренную пластичность ( $\delta=2-7\%$ ) и высокие антифрикционные свойства. Из него изготавливают звенья и ролики конвейеров, втулки, муфты, тормозные колодки.

Недостаток производства ковкого чугуна заключается в большой длительности отжига. Его применяют главным образом для изготовления тонкостенных деталей (при сечении отливки свыше 50 мм в сердцевине образуется пластинчатый графит и чугун становится не пригодным для отжига).

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом является одним из наиболее ценных и перспективных конструкционных материалов для современного машиностроения и металлургии. Его получение достигается модифицированием жидкого чугуна небольшими добавками отдельных элементов. Установлено [4], что если в жидкий чугун ввести слабо растворяющийся в нем металл (чаще для этой цели применяют магний в количестве 0,03–0,07%) или сплав, температура кипения которого ниже температуры жидкого чугуна, такая добавка способствует зарождению шаровидного графита в остатках пузырьков пара этого металла. Шаровидный графит, имеющий минимальную поверхность при заданном объеме, меньше ослабляет металлическую основу чугуна, чем пластинчатый графит. В отличие от пластинчатого шаровидный графит не является активным концентратором напряжений. Чугуны с шаровидным графитом имеют пластичность, прочность, износостойкость, коррозионную стойкость, близкие к свойствам углеродистой и легированной стали. При этом они сохраняют хорошие литейные свойства и обрабатываемость резанием, способность гасить вибрации, высокую износостойкость. В то же время стоимость отливок из этого материала на 25–50% ниже стоимости отливок и поковок из стали и ковкого чугуна.

В некоторых случаях оптимальное для конкретного изделия сочетание физико-механических свойств обеспечивает вермикулярная (промежуточная между шаровой, хлопьевидной и пластинчатой) форма графитовых включений, образующаяся при определенных режимах охлаждения модифицированного чугуна.

Вариации структуры и физико-механических свойств чугуна, кроме изменения его химического состава, режимов модифицирования, затвердевания, остывания и отжига, могут быть обеспечены также закалкой и отпуском отливок [5].

Разнообразие физико-механических свойств чугунов позволяет конструкторам выбрать необходимый материал для создания различных отливок с учетом режимов их дальнейшей обработки и эксплуатации. Однако возможные (а зачастую и неизбежные в силу неопределенности химического состава и вариаций режимов затвердевания, охлаждения и термообработки отливок) изменения структурообразующих факторов обуславливают необходимость контроля структуры готовой отливки, особенно в случае ее последующей эксплуатации в узлах ответственного назначения или обработки дорогостоящим инструментом. При этом ни одна из описанных выше структур чугунов не является заведомо «бракованной» или «годной», а становится таковой лишь с учетом задачи изготовления и последующей эксплуатации отливки.

Непосредственное измерение механических свойств [6] или структуры [7] трудоемко, непроизводительно и требует разрушения контролируемого объекта для подготовки микрошлифов или стандартных образцов, разрушает отливку и

исключает возможность ее дальнейшей эксплуатации. Предусмотренные для этой цели технологические приливы не всегда гарантируют соответствие структуры прилива и отливки из-за различных условий затвердевания и остывания. Гарантию соответствия структуры отливки заданной могут дать только неразрушающие методы контроля. Разнообразие возможных структур чугуна, условий и факторов их формирования предопределяет разнообразие задач и физических методов контроля структуры чугунных отливок.

Магнитный контроль чугунных отливок основан на различии магнитных свойств структурных составляющих чугуна и в соответствии с этим чугунов с разной структурой [8–11]. Результаты обобщения исследований [11] диапазонов изменения магнитных свойств (коэрцитивной силы  $H_c$ , максимальной магнитной проницаемости  $\mu_m$  и намагниченности насыщения  $M_s$ ) и удельного электрического сопротивления  $\rho$  чугунов со структурами белого, серого, ковкого и высокопрочного чугунов при различных структурах металлической матрицы приведены в таблице.

Магнитные и электрические свойства чугунов с различной структурой [11]

Тип чугуна	Тип металлической основы	$H_c$ , А/см	$\mu_m$	$M_s$ , А/см	$\rho$ , мкОм·см
Белый чугун		10,4–12,8	180–200	10350	40–80
Серый чугун	Ферритная	2,0–4,0	600–1500	14330	45–120
	Перлитная	5,6–10,6	200–450	13930	
Высокопрочный чугун	Ферритная	1,2–2,0	1600–2400	15130	40–50
	Перлитная	4,0–8,8	300–600	14730	55–75
Ковкий чугун	Ферритная	1,2–2,0	1500–2300	14330	28–37
	Перлитная	4,0–8,8	300–800	13930	

Обзор литературных данных показывает, что закономерностей между количеством углерода и магнитными свойствами чугуна не наблюдается, так как определяющее влияние на магнитные свойства оказывает не содержание, а состояние углерода в чугуне.

Наибольшую  $H_c$  и наименьшие  $\mu_m$  и  $M_s$  имеет белый чугун. Увеличение степени графитизации приводит к снижению  $H_c$  и росту  $\mu_m$ , в особенности при распаде последних остатков цементита. Это объясняется увеличением в структуре чугуна мягкой магнитной компоненты — феррита и снижением внутренних микронапряжений за счет того, что графит создает меньшие структурные микронапряжения, чем цементит. Кроме того, уменьшение объема, занимаемого графитом, по сравнению с объемом исходного цементита, приводит к уменьшению коэффициента внутреннего размагничивания, так как графит и цементит можно рассматривать как немагнитные включения или пустоты, которые являются местами образования внутренних размагничивающих полей. Исследования влияния формы магнитных включений показали [10, 11], что чем она ком-

пактнее, тем мягче в магнитном отношении чугун. Поэтому высокопрочный и ковкий чугуны с шаровидной и хлопьевидной формами графита имеют большую  $\mu_m$  и  $M_s$  и меньшую  $H_c$  по сравнению с серым чугуном той же структуры металлической основы. Укрупнение частиц графита как пластинчатой, так и шаровидной формы, приводит к снижению  $H_c$ , увеличению  $\mu_m$  и  $M_s$ . Различие в химическом составе чугунов вызывает разброс магнитных характеристик. Несмотря на это, можно говорить о существовании однозначной зависимости  $H_c$  и  $\mu_m$  от степени графитизации, поскольку влияние соотношения графита и цементита на эти параметры больше, чем других факторов.

Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  структурных составляющих чугуна сильно различается [12, 13]. У феррита оно составляет 10 мкОм·см, перлита — 20, цементита — 140, графита — 30–10 000 мкОм·см (в зависимости от его формы и ориентации пластин относительно направления тока). Это приводит к изменению электрического сопротивления чугунов с различной структурой почти на порядок и делает пря-

мое или косвенное измерение  $\rho$  в совокупности с магнитными параметрами перспективным для контроля структуры отливок.

Таким образом, разграничение чугунов с различной структурой друг от друга по результату измерения магнитных параметров может быть рекомендовано в следующих основных случаях.

Белый чугун от чугунов всех других типов может быть надежно выделен по результату измерения  $H_C$  или  $\mu_m$ . Различие этих параметров белого чугуна и ферритных чугунов других типов составляет от 3 до 10 раз, что практически исключает их перепутывание при контроле. Различие  $H_C$  и  $\mu_m$  белого и перлитных ковкого и высокопрочного чугунов также достаточно для их уверенной сортировки (1,2–3,0 раза). Применение магнитного контроля качества отжига отливок из белого чугуна на ковкий [14–24] — одно из наиболее удачных и надежных использований магнитного неразрушающего контроля.

В среднем различие  $H_C$  и  $\mu_m$  белого и перлитного серого чугунов составляет около 50%, но в некоторых случаях можно ожидать, что они могут оказаться достаточно близкими. Для повышения достоверности контроля в этих случаях следует рекомендовать дополнительное измерение магнитных параметров, определяемых  $M_S$ .

По результату измерения  $H_C$  или  $\mu_m$  может быть решена задача разбраковки перлитного и ферритного чугунов всех типов друг от друга. В [25] решена задача определения количественного соотношения содержания перлита и феррита в ковком чугуне на основе измерения остаточной намагниченности в отливках с большим размагничивающим фактором после намагничивания до технического насыщения.

Различные аспекты применения магнитного метода для контроля структуры отливок из высокопрочного чугуна рассмотрены в [23, 24, 26–38].

При решении задачи определения количественного соотношения содержания перлита и феррита в высокопрочном чугуне следует учитывать, что повышение  $H_C$ , свойственное повышению содержания перлита в металлической матрице чугуна, может быть вызвано также увеличением доли пластинчатых ферритовых включений в чугуне с шаровидным графитом. Поэтому по измерению этих параметров можно уверенно выделить от других типов чугуна лишь ферритный высокопрочный чугун [39]. Перлитный высокопрочный чугун по результату измерения  $H_C$  может быть отбракован от серого только при гарантии сохранения неизменной металлической основы чугуна. Для отбраковки перлитного высокопрочного чугуна от ферритного серого следует рекомендовать одновременное измерение  $H_C$  и  $\mu_m$  или дополнительное измерение не магнитного параметра, например, скорости звука.

Контроль свойств отливок из серого чугуна, наличия толщины и твердости отбеленного слоя на нем магнитным методом проанализирован в [11]. Наиболее успешные результаты контроля в этом случае обеспечивает применение метода высших гармоник [40, 41].

Таким образом, магнитный контроль структуры чугунных отливок во многих случаях может быть основан на различии их  $H_C$ . Однако процесс непосредственного измерения  $H_C$  требует существенных энергетических затрат на намагничивание и последующее размагничивание материала. Это длительный процесс даже при использовании коэрцитиметров с приставным электромагнитом [42], не позволяющий производить контроль чугунных отливок с производительностью свыше 450 отл/ч [43]. Приборы, принцип действия которых основан на косвенном измерении  $H_C$  [42, 43] (коэрцитиметры КИФМ различных модификаций разработки Института физики металлов РАН, г. Екатеринбург и МНПО «Спектр», г. Москва, коэрцитиметр КРМ-Ц научно-производственной фирмы «Специальные научные разработки», г. Харьков, Импульсные магнитные анализаторы типа ИМА разработки Института прикладной физики НАН Беларуси), как правило, требуют для своей работы сетевого источника питания, не являются автономными и компактными. Эти приборы не всегда удобно использовать непосредственно в цехах промышленных предприятий. Наиболее удачная современная реализация магнитного метода осуществлена в приборе «Сортировщик магнитный МС-1» [37, 38]. Прибор позволяет осуществить сортировку чугунных отливок со структурой серого чугуна от отливок из высокопрочного чугуна, отбраковывать отливки из ковкого чугуна, содержащие отбел или перлитную структуру. Процессу сортировки предшествует этап предварительных исследований по установлению браковочных пределов для выделения «годной» чугунной отливки от «брака» для конкретных объектов.

При контроле массовых партий чугунных отливок необходимо применять высокопроизводительные приборы [22–25], основанные на измерении остаточного магнитного потока  $\Phi_d$  в контролируемых отливках в процессе их движения. Оптимальным для контроля является прибор «Магнитный анализатор качества структуры изделий Макси-П (портативный)» [22–25], который используется на Минском заводе отопительного оборудования и ряде чугунолитейных и машиностроительных предприятий России.

### Выводы

Проведенный анализ возможностей и ограничений магнитного контроля структуры чугунных отливок показал, что разграничение чугунов с различной структурой друг от друга по результату

измерения магнитных параметров может быть рекомендовано для:

- выделения белого чугуна от чугунов всех других типов (в том числе для контроля качества отжига белого чугуна на ковкий, контроля наличия отбела на поверхности отливок из серого чугуна);
- разбраковки перлитного и ферритного чугунов всех типов друг от друга (имеются предположения возможности количественного анализа соотношения феррита и перлита в ковком и высокопрочном чугунах);
- контроля формы графитовых включений в чугуне при постоянной структуре металлической матрицы. При возможности одновременного изменения структуры металлической матрицы и появления пластинчатого графита в высокопрочном чугуне возможно уверенное выделение ферритного высокопрочного чугуна от серого. Для отбраковки перлитного высокопрочного чугуна от ферритного серого следует рекомендовать одновременное измерение  $H_C$  и  $\mu_m$  или дополнительное измерение не магнитного параметра, например, скорости звука.

Как лучшие из аналогов по функциональным возможностям и техническим характеристикам для контроля структуры локальных участков крупногабаритных отливок может быть рекомендован прибор «Сортировщик магнитный МС-1», а для сортировки по структуре массовых партий малогабаритных отливок — прибор «МАКСИ-П».

## Литература

1. Бунин К.П., Таран Ю.Н. Строение чугуна. М.: Металлургия, 1972.
2. Бунин К.П., Малиночка Я.Н., Таран Ю.Н. Основы металлографии чугуна. М.: Металлургия, 1969.
3. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учеб. для машиностроительных вузов. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1980.
4. Горшков А.А. О механизме образования шаровидного графита // Литейное производство. 1955. № 3. С. 17–21.
5. Русин П.И., Гофман Л.А., Капустянский М.А. Магнитная структуроскопия термически обработанного чугуна. Ростов-на-Дону: Ростовский университет, 1978.
6. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. М., 1974. Т. 1, 2.
7. ГОСТ 3443-87. Методы определения структуры.
8. Карамара А. Основные положения магнитных методов контроля состояния и качества чугунных отливок // 25-й Международный конгресс литейщиков. М.: Машиностроение, 1961. С. 454–475.
9. Карамара А., Рутковский Я. Проблемы, связанные с практическим применением магнитных методов контроля влияния термической обработки // 30-й международный конгресс литейщиков. М.: Машиностроение, 1967. С. 169–190.
10. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Связь магнитных свойств со структурным состоянием вещества — физическая основа магнитного структурного анализа (обзор) // Дефектоскопия. 1981. № 8. С. 5–21.
11. Горкунов Э.С., Сомова В.М., Ничипурок А.П. Магнитные свойства и методы контроля структуры и прочностных характеристик чугунных изделий (обзор) // Дефектоскопия. 1994. № 10. С. 54–82.
12. Гиршкович Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. М.; Л.: Машиностроение, 1966.
13. Чернобровкин В.П. Изменение электропроводности чугуна в связи с образованием в нем графита // ФММ. 1957. Т. 4. № 3. С. 564–566.
14. Жаднов К.П. Контроль отжига ковкого чугуна по магнитным свойствам. — Литейное производство. 1954. № 1. С. 29–30.
15. Русин П.И., Гофман Л.А., Смоляников А.И., Шапкин В.М. Прибор для контроля твердости деталей из ковкого чугуна // Литейное производство. 1962. № 8. С. 38–39.
16. Богданов В.А., Красюк С.В., Медведев В.С., Соколинская И.Г. Прибор-автомат для разбраковки литых чугунных ниппелей по твердости // Дефектоскопия. 1965. № 6. С. 35–40.
17. Русин П.И., Гофман Л.А. Магнитные и электрические свойства термически обработанного ковкого чугуна // Дефектоскопия. 1967. № 5. С. 57–64.
18. Старосельский В.Я., Дыбаль В.Г., Дейнекин В.В., Курневич П.И. Неразрушающий контроль качества термообработки отливок из ковкого чугуна // Автомобильная промышленность. 1979. № 6. С. 26–27.
19. Миневиц А.Ш. Определение механических свойств ковкого чугуна неразрушающим методом // Завод. лаб. 1988. № 1. С. 92–95.
20. Бродский А.М., Мысловский В.С. Неразрушающий контроль отливок из ковкого чугуна // Литейное производство. 1999. № 6. С. 14–15.
21. Сандомирский С.Г. Анализ метода контроля движущихся ферромагнитных изделий по коэрцитивной силе // Дефектоскопия. 1991. № 6. С. 27–34.
22. Сандомирский С.Г. Магнитный контроль физико-механических свойств изделий массового производства в движении (обзор) // Дефектоскопия. 1996. № 7. С. 25–45.
23. Сандомирский С.Г. Современное состояние магнитного метода контроля механических свойств стальных и чугунных изделий машиностроения // Надежность машин и технических систем. Материалы МНТК. Мн., 2001. Т. 1. С. 145–146.
24. Сандомирский С.Г., Писаренко Л.З., Лукашевич С.Ф. Опыт использования приборов МАКСИ для автоматизированного контроля структуры отливок из ковкого и высокопрочного чугунов магнитным методом // Литейное производство. 2002. № 3. С. 41–44.
25. Сандомирский С.Г., Писаренко Л.З., Лукашевич С.Ф. Количественный анализ взаимосвязи микроструктуры и магнитных свойств изделий типа «ниппель 1 $\frac{1}{4}$ » из ковкого чугуна КЧ 30-6 // Дефектоскопия. 2002. № 4. С. 18–24.
26. Ивлев В.И., Яновский А.М., Снежный Р.Л. Электромагнитный метод контроля отливок из чугуна с шаровидным графитом. М.: ГОСНИИТИ, 1962. Вып. 7.
27. Ивлев В.И. Электромагнитный метод контроля формы графита и структуры металлической основы в отливках из высокопрочного чугуна // Высокопрочный чугун. Киев: Гостехиздат, 1964. С. 251–256.
28. Ващенко К.И., Сумцов В.Ф. Магнитные свойства магниевого чугуна и его применение в конструкциях электромагнитных сепараторов // Высокопрочный чугун. Киев: Гостехиздат, 1964. С. 289–296.
29. Ващенко К.И., Сумцов В.Ф. Магнитные свойства магниевого чугуна // Литейное производство. 1964. № 7. С. 28–31.
30. Ивлев В.И., Костецкий М.И. Магнитные методы и приборы для контроля структур отливок из чугуна с шаровидным графитом // Дефектоскопия. 1965. № 3. С. 43–53.
31. Ивлев В.И. Контроль структуры металлической основы и формы графита в отливках коленчатых валов из высокопрочного чугуна магнитным методом // Дефектоскопия. 1965. № 6. С. 27–30.
32. Миневиц А.Ш., Шульте Ю.Г. Магнитные свойства высокопрочного чугуна и их использование для прогнозирования механических свойств непосредственно в от-

ливках // XI Всесоюз. НТК «Неразрушающие физические методы и средства контроля» М., 1987. Ч. 2.

33. Бурцева В.А., Правдин Л.С., Шербинин В.Е., Яковлев С.Г. К выбору методики неразрушающего контроля механических свойств высокопрочного чугуна // Дефектоскопия. 1986. № 4. С. 67–75.

34. Бурцева В.А., Правдин Л.С., Шербинин В.Е., Яковлев С.Г. О возможности контроля механических свойств высокопрочного чугуна магнитоупругоакустическим методом // Дефектоскопия. 1987. № 2. С. 10–18.

35. Писаренко Л.З., Сандомирский С.Г., Лукашевич С.Ф. Возможность контроля обрабатываемости мелких отливок из высокопрочного чугуна магнитным методом // Тез. докл. IV съезда литейщиков России. М., 1999. С. 97–103.

36. Сандомирский С.Г., Стаценко Н.Б., Сандомирская Е.Г., Грудницкий И.П. Результаты анализа возможности разбраковки чугунных отливок по структуре прибором «Сортировщик магнитный МС-1» // Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка. Материалы МНТК. Могилев. 2000.

37. Сандомирский С.Г. Контроль структуры крупногабаритных отливок из высокопрочного чугуна прибором

«Сортировщик магнитный МС-1» // Литье и металлургия. 2004. №2(30). С. 165–167.

38. Сандомирский С.Г., Цукерман В.Л., Линник И.И., Сандомирская Е.Г. Универсальный магнитный сортировщик и его применение для решения задач неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2004. № 8. С. 27–31.

39. 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. Ч. 2. С. 143–148.

40. Ершов Р.Е., Быкова Л.Е., Иваненко Т.Г., Конов С.А. Метод и прибор для локального контроля поршневых колец // Дефектоскопия. 1987. № 10. С. 3–10.

41. Белов И.Ю., Карамышев М.А. Установка для контроля твердости отбеленного чугуна методом высших гармоник // Завод лаб. 1982. № 4.

42. Горкунов Э.С. Магнитные приборы контроля структуры и механических свойств стальных и чугунных изделий (обзор) // Дефектоскопия. 1992. № 10. С. 3–35.

43. Горкунов Э.С., Захаров В.А. Коэрцитиметры с приставными магнитными устройствами (обзор) // Дефектоскопия. 1995. № 8. С. 69–88.