



The results of measuring by devices MAXI and MS of magnetic parameters of castings of high-test cast iron VCh 50, produced under technological regime and with violation of modification regime, are compared to the characteristics of the castings structure under GOST 3443-87. It is shown that at the equal shape of graphite impurities the change of the pearlite contents in metallic matrix increases coercive force of controlled materials by 2,8 times.

С. Г. САНДОМИРСКИЙ, ИМИНМАШ НАН Беларуси,
В. Л. ЦУКЕРМАН, ИПФ НАН Беларуси,
Л. З. ПИСАРЕНКО, ОАО "МЗОО"

УДК 620.179.14

АНАЛИЗ ПРЕДПОСЫЛОК КОЛИЧЕСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

Важным приоритетом экономической политики Республики Беларусь является развитие машиностроительного комплекса. Решение задачи улучшения качества и повышения конкурентоспособности продукции машиностроения связано с подъемом технического уровня литейного производства и увеличения его объемов. На основании планируемого увеличения выпуска продукции машиностроения (тракторы, автомобили, сельхозмашины) наиболее высокими темпами будет увеличиваться производство высокопрочного чугуна.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом [1], появление которого в 1947 г. явилось выдающимся открытием в области чугунолитейного производства, — один из наиболее ценных и перспективных конструкционных материалов для современного машиностроения и металлургии. Этот чугун ценен тем, что при хороших литейных свойствах имеет пластичность, прочность, износостойкость, коррозионную стойкость, близкие к свойствам углеродистой и легированной стали. В то же время себестоимость отливок из этого материала на 25–50% ниже себестоимости отливок и поковок из стали и ковкого чугуна. В развитых странах стальные отливки и поковки, сварные и кованные изделия, ковкий и серый чугун с большой выгодой заменяют на высокопрочный чугун. На Белорусском и Минском автомобильных, Бобруйском машиностроительном, Минском тракторном и других заводах также осуществляется переход к выпуску отливок из высокопрочного чугуна взамен отливок из серого и ковкого чугунов.

Получение высокопрочного чугуна достигается модифицированием жидкого чугуна небольшими добавками отдельных элементов. Установлено [2], что если в жидкий чугун ввести слабо растворяющийся в нем металл или сплав, тем-

пература кипения которого ниже температуры жидкого чугуна и достаточно активный, чтобы пары его давали с газами, в состав которых входит кислород, реакцию окисления, то такая добавка способствует зарождению шаровидного графита в остатках пузырьков пара этого металла. Нарушения однородности и температурных режимов внутри ковшового или внутри форменного модифицирования приводят к появлению отливок или их участков со структурой серого чугуна (содержащих пластинчатый графит), что недопустимо снижает потребительские свойства отливок.

Стандартные методы определения структуры чугуновых отливок [3] трудоемки, не производительны и требуют разрушения контролируемого объекта для подготовки микрошлифов. Необходимость отбраковки отливок со структурой серого чугуна от отливок из высокопрочного чугуна и классификации отливок из высокопрочного чугуна по структурам в соответствии с [3] обусловила целесообразность проведения исследований по разработке неразрушающих методик сортировки чугуна по структуре.

Успешные результаты по определению физических параметров высокопрочного чугуна, связанных с его структурой, получены при использовании звукового [4], ультразвукового [5–7], магнитоупругого [8], магнитоупругоакустического [9] и магнитного [10–24] методов неразрушающего контроля.

Ультразвуковой метод основан на взаимосвязи между упругими и диссипативными свойствами чугуна и его структурой. В качестве параметра, изменение которого коррелирует с содержанием и средним размером частиц шаровидного графита, используется скорость распространения ультразвуковых колебаний в металле [6, 7]. Изменение

скорости ультразвука и величины его затухания является мерой изменения формы графита от сфероидальной до крупнопластинчатой. Серийно выпускаемые ультразвуковые структуроскопы, работающие на этом принципе, можно применять для контроля структуры отливок из высокопрочного чугуна. Совершенствование классического теневого импульсно-фазового метода [25] позволяет повысить точность измерения скорости ультразвука в металле отливки, но не позволяют разделить влияние содержания и размеров шаровидных включений в чугуне (см. рис. 1 [25]), а также определить структуру его металлической основы. Кроме того, при контроле формы графитных включений звуковой метод [4] имеет преимущество перед ультразвуковым.

В магнитоупругоакустическом методе в качестве информационного параметра используются величина наводимой ЭДС магнитоупругого преобразователя и величина намагничивающего тока, соответствующего дифференциальной точке Виллари [9]. Совместное использование обоих параметров повышает точность контроля, однако корреляционная связь между твердостью, временным сопротивлением разрыву, относительным удлинением и параметрами неразрушающего контроля остается малой.

Магнитный контроль чугуновых отливок основан на различии магнитных свойств (прежде всего коэрцитивной силы H_c [10, 17, 19, 22] и магнитной проницаемости μ [10–16, 19]) чугунов с разной структурой. Обзор литературных данных показывает, что увеличение степени графитизации приводит к снижению H_c и увеличению μ , 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 [17, 19], что чем она компактнее, тем мягче в магнитном отношении чугун. Поэтому высокопрочный чугун с шаровидной формой графита имеет меньшую H_c по сравнению с серым чугуном при одной и той же структуре матрицы. Различие в химическом составе чугунов вызывает разброс магнитных характеристик. Несмотря на это, можно говорить о существовании однозначной зависимости H_c и μ от степени графитизации, поскольку влияние

соотношения графита и цементита на нее больше, чем других факторов.

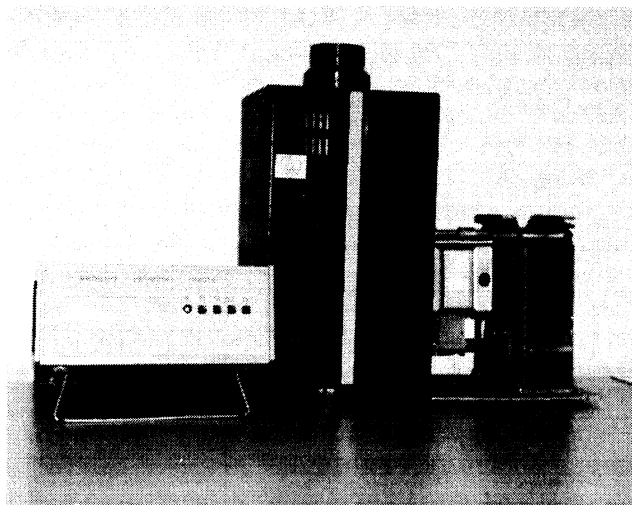
Современный уровень развития средств магнитного контроля структуры изделий обеспечивает их беспрепятственное использование в действующих циклах производства чугуновых отливок непосредственно в цехах промышленных предприятий, позволяет существенно снизить погрешности контроля, связанные с влиянием мешающих факторов, особенно при контроле малогабаритных изделий [26, 28]. Актуальна задача определения количественной взаимосвязи магнитных параметров чугуновых отливок, измеряемых неразрушающим методом, с характеристиками структуры чугунов.

Цель настоящей работы – определение взаимосвязи структурных параметров отливок из высокопрочного чугуна, определенных в соответствии с [3], с информационными параметрами приборов неразрушающего контроля типа МАКСИ [26] и МС [27]. Особенностью исследования является также одновременное измерение магнитного параметра образцов с использованием проходного и накладного преобразователей.

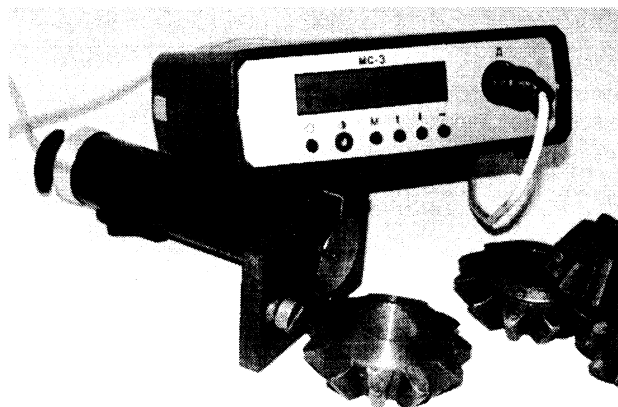
Внешний вид использованных приборов МАКСИ и МС показан на рис. 1.

Приборы серии МАКСИ (магнитные анализаторы качества структуры изделий) работают на основе коэрцитиметрического метода и предназначены для высокопроизводительного автоматизированного контроля механических свойств ферромагнитных деталей. Принцип работы прибора заключается в бесконтактном намагничивании контролируемого изделия при его свободном падении сквозь область с намагничивающим полем постоянной напряженности, измерении остаточного магнитного потока Φ_R в изделии, сравнении измеренной величины с предварительно установленными порогами годности изделия и автоматической сортировке изделий на годные и брак по результатам сравнения. Производительность контроля в приборах МАКСИ достигает 3 изделий в 1 с. Существующие модификации датчиков обеспечивают контроль деталей длиной до 200 мм, поперечным размером до 90 мм. Приборы обеспечивают эффективный 100%-ный контроль продукции на предприятиях с крупносерийным и массовым производством. Они успешно эксплуатируются на Минском заводе отопительного оборудования, Колпинском литейно-механическом заводе, Мценском литейном заводе и других предприятиях для сортировки по структуре малогабаритных отливок из ковкого и высокопрочного чугунов.

Еще одним прибором, реализующим коэрцитиметрический метод, является автономный магнитный сортировщик МС. Этот портативный прибор предназначен для сортировки ферромагнитных



а



б

Рис. 1. Внешний вид магнитного анализатора качества структуры изделий МАКСИ (а) и магнитного сортировщика МС (б)

материалов по маркам, контроля степени закалки, структурных неоднородностей чугуна (в том числе высокопрочного). Непосредственно измеряемый прибором параметр – градиент ∇H нормальной составляющей поля остаточной намагниченности (в диапазоне от $2 \cdot 10^2$ до $1,5 \cdot 10^5$ А/м²) над поверхностью контролируемого объекта после его намагничивания постоянным магнитом по методу точечного полюса.

В качестве образцов для исследования использованы изделия в виде составного цилиндра со скосами диаметром от 18 до 40 мм, длиной 73 мм, изготовленные из высокопрочного чугуна марки ВЧ50. Часть образцов была изготовлена с нарушением режима модифицирования и охлаждения. Благодаря этому удалось обеспечить весь возможный диапазон изменения типов структур и магнитных свойств образцов. На первом этапе исследования прибором МАКСИ измеряли Φ_R в отливках после их свободного падения сквозь преобразователь прибора. Максимальная напряженность намагничивающего поля составляла 38 кА/м. По результатам измерения было отобрано 12 образцов, имеющих величину Φ_R во всем возможном диапазоне ее изменения. Отобранные

образцы были разрезаны в экваториальной плоскости и на полученном шлифе определена их микроструктура в соответствии с [3]. После этого на поверхности шлифов размагниченных образцов прибором МС были измерены значения ∇H после намагничивания методом точечного полюса с использованием постоянного магнита прибора.

Результаты измерения Φ_R и ∇H (усредненные для каждого образца по нескольким измерениям) и микроструктур образцов приведены в таблице. На рис. 2 показана взаимосвязь показаний двух приборов, реализующих коэрцитиметрический магнитный метод контроля (МАКСИ – с использованием измерения интегрального по всему объему изделия параметра Φ_R , МС – с использованием локального измерения ∇H непосредственно над поверхностью микрошлифа после намагничивания постоянным магнитом по методу «точечного полюса»). На рис. 3 показания приборов МАКСИ и МС сопоставлены с содержанием перлита в отливках из высокопрочного и серого чугунов. Анализ полученных результатов показывает, что значения магнитных параметров, измеренных двумя использованными приборами, взаимосвязаны между собой с коэффициентом корреляции более 0,996. Измерение параметра Φ_R проходным преобразователем приборов МАКСИ обеспечивает отстройку от непостоянства зазора между преобразователем и изделием, более высокую (до 3 изделий в 1 с) производительность контроля и реализацию возможности автоматической сортировки изделий по его результатам. Поэтому, когда это позволяют размеры отливок, следует использовать приборы этого типа и реализуемую ими методику для контроля структуры массовых партий чугунных отливок.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что определяющее значение на показания обоих приборов оказывают форма графитных включений и соотношение феррита и перлита в металлической матрице отливок и позволяют произвести следующую количественную оценку влияния соотношения феррита и перлита в структуре матрицы металлической основы чугунов с шарообразной и пластинчатой формой графитных включений. Для чугуна с шаровидным графитом изменение содержания перлита в металлической матрице от 0 до 45 % повышает показания приборов в среднем в 1,775 раза. Для чугуна с пластинчатым графитом изменение содержания перлита в металлической матрице от 45 до 100% повышает показания приборов в среднем в 1,562 раза. Таким образом, можно отметить, что при одинаковой форме графитных включений изменение содержания перлита в металлической матрице от 0 до 100% (соответственно изменение содержания феррита в металлической матрице от 100% до 0) повышает показания приборов (и, следо-

Показания приборов МАКСИ и МС при контроле чугуновых отливок с различными структурами

Номер детали	Описание микроструктуры по ГОСТ 3443-87	Тип чугуна в соответствии со структурой	Показания прибора МАКСИ, $\Phi_{R \times 167}$, мкВб	Показания прибора МС $\nabla H \cdot 10^{-2}$, А/м ²
8 (1п)	ШГф5 - ШГд15 - Ф	Высокопрочный	98	42
6 (1п)	ШГф5 - ШГд15 - Ф	То же	104	48
0	ШГф5 - ШГд15 - Ф	»	114	45
4 (1п)	ШГф5 - ШГд45 - Ф	»	124	54
9	ШГф5 - ШГд45 - П20	»	170	68
8	ШГф5 - ШГд45 - П45	»	190	86
21	Колонии ВГр4 - П6	Вермикулярный	228	100
22	Колонии ВГр4 - П6	То же	259	113
24	ПГф1 - ПГд45 - П45	Серый	298	140
23	ПГф1 - ПГд45 - П70	То же	336	164
11	ПГф1 - ПГд45 - П	»	450	227
15	ПГф - ПГд100 - П	»	465	218

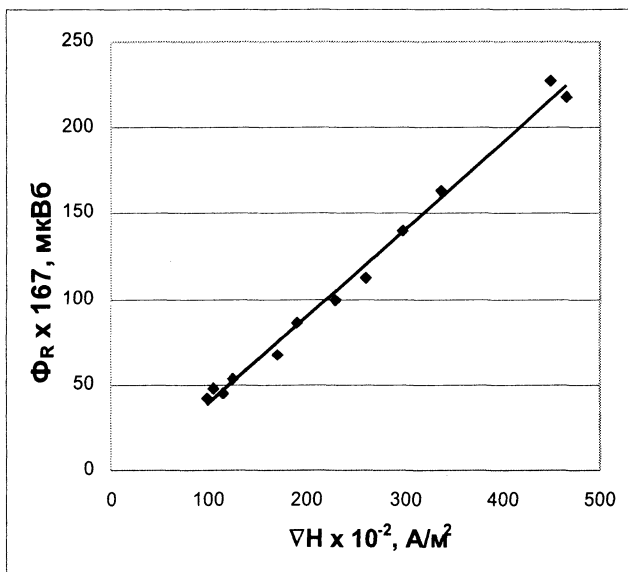


Рис. 2. Взаимосвязь между показаниями приборов МАКСИ и МС при контроле параметров чугуновых отливок с различной структурой

вательно, связанную с ними коэрцитивную силу контролируемых материалов) примерно в 2,8 раза. Полученный результат хорошо коррелирует как с известными оценками [19] соотношения коэрцитивных сил высокопрочного и серого чугунов с различной структурой металлической основы, так и с результатами исследований влияния соотношения феррита и перлита на остаточный магнитный поток в малогабаритных отливках из ковкого чугуна, измеренный прибором МАКСИ-П [28].

Следует отметить, что наблюдавшееся в некоторых работах [19] снижение магнитной жесткости образцов из высокопрочного и серого чугунов с увеличением размеров графитных включений при сохранении их формы нами достоверно не подтверждено.

Значения измеренных магнитных параметров образцов со структурой высокопрочного чугуна при одинаковом соотношении феррита и перлита

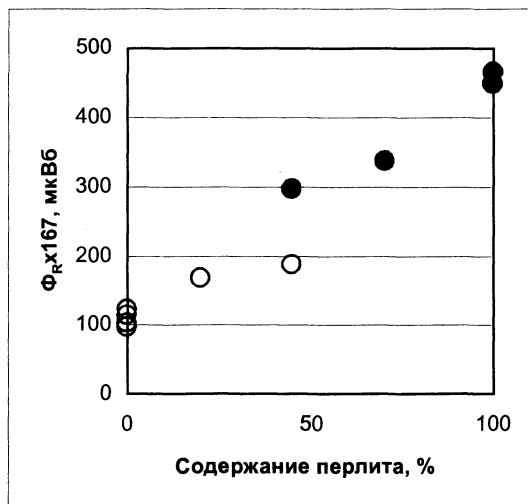


Рис. 3. Зависимость показаний прибора МАКСИ (а) и МС (б) от процентного содержания перлита в отливках со структурой высокопрочного (O) и серого (•) чугунов

в металлической матрице в среднем в 1,6 раза меньше, чем для серого чугуна. При этом в отливках со структурой серого чугуна преобладает перлитная структура, а в отливках из высокопрочного чугуна — ферритная. Это еще больше (до 1,8–2,2 раза [24]) увеличивает разницу в магнитных свойствах отливок из высокопрочного и серого чугунов при сортировке промышленных партий изделий и делает практически невозможным перепутывание отливок со структурами высокопрочного и серого чугунов при их контроле магнитным методом по параметрам, пропорциональным коэрцитивной силе контролируемых материалов. Более того, при получении промежуточных значений магнитных параметров можно с большой долей вероятности предполагать наличие в контролируемой отливке «промежуточной» вермикулярной структуры графитных включений (см. таблицу).

Заключение

Экспериментальным исследованием взаимосвязи микроструктуры по ГОСТ 3443-87 малогабаритных отливок из высокопрочного чугуна ВЧ50 с показаниями коэрцитивно чувствительных приборов неразрушающего контроля, реализующих объемно- и поверхностночувствительные методы получения информации о свойствах объекта, установлено:

1. Значения магнитных параметров Φ_R и VH , измеренных на образцах малогабаритных отливок из высокопрочного чугуна ВЧ50 приборами МАКСИ и МС, взаимосвязаны между собой с коэффициентом корреляции, близким к 1.

2. При одинаковой форме графитных включений изменение содержания перлита в металлической матрице от 0 до 100 % (соответственно изменение содержания феррита в металлической матрице от 100 % до 0) повышает показания Φ_R и VH приборов МАКСИ и МС (и связанную с ними коэрцитивную силу высокопрочного и серого чугунов) в 2,8 раза.

3. Значения измеренных приборами МАКСИ и МС магнитных параметров Φ_R и VH образцов со структурой высокопрочного чугуна при одинаковом соотношении феррита и перлита в металлической матрице исследованных чугунов в среднем в 1,6 раза меньше, чем для серого чугуна.

4. В реальных промышленных партиях отливок из высокопрочного чугуна ВЧ50, изготовленных при соблюдении технологических режимов модифицирования, преобладает ферритная структура. При отклонениях температурных и временных режимов модифицирования наряду с появлением пластинчатого графита в структуре отливки преобладает перлит. Это увеличивает разницу в магнитных свойствах отливок из высокопрочного и серого чугунов и делает практически невозможным их перепутывание при контроле магнитным методом.

Литература

1. Бунин К.П., Таран Ю.Н. Строение чугуна. М.: Металлургия, 1972.
2. Горшков А.А. О механизме образования шаровидного графита // Литейное производство. 1955. № 3. С. 17–21.
3. ГОСТ 3443-87. Методы определения структуры. М.: Изд-во стандартов, 1990.
4. Прохоров А. М., Алексеев Г.Н., Веревкин П.М., Старков В.Е. Опыт применения неразрушающего контроля на Волжском автозаводе // Дефектоскопия. 1981. № 12. С. 82–85.
5. Химченко Н.В. Контроль структуры коленчатых валов из высокопрочного чугуна // Литейное производство. 1962. № 8. С. 9–13.
6. Воронкова Л.П. Ультразвуковой контроль чугуна. М.: ЦНИИМАШ, 1996.
7. Иванушкин П.Н. Неразрушающий контроль чугуна. Киев: Наукова думка, 1983.
8. 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.
9. 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.
10. Карамара А. Основные положения магнитных методов контроля состояния и качества чугунных отливок // 25-й Междунар. конгресс литейщиков. М., 1961.
11. Ивлев В.И., Яновский А.М., Снежной Р.Л. Электромагнитный метод контроля отливок из чугуна с шаровидным графитом. М.: ГОСНИИТИ. 1962. Вып. 7. С. 454.
12. Ивлев В.И. Электромагнитный метод контроля формы графита и структуры металлической основы в отливках из высокопрочного чугуна // Высокопрочный чугун: Сб. докл. на Всесоюз. сов. по теории и практике производства отливок из высокопрочного чугуна. Киев: Гостехиздат, 1964. С. 251–256.
13. Ващенко К.И., Сумцов В.Ф. Магнитные свойства магниевого чугуна и его применение в конструкциях электромагнитных сепараторов // Высокопрочный чугун: Сб. докл. на Всесоюз. сов. по теории и практике производства отливок из высокопрочного чугуна. Киев: Гостехиздат, 1964. С. 289–296.
14. Ващенко К.И., Сумцов В.Ф. Магнитные свойства магниевого чугуна // Литейное производство. 1964. № 7. С. 28–31.
15. 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.
16. 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.
17. Русин П. И., Гофман Л.А., Капустянский М.А. Магнитная структуроскопия термически обработанного чугуна. Ростов-на-Дону: Ростовский университет, 1978.
18. Миневиц А.Ш., Шульте Ю.Г. Магнитные свойства высокопрочного чугуна и их использование для прогнозирования механических свойств непосредственно в отливках // XI Всесоюз. науч.-техн. конф. «Неразрушающие физические методы и средства контроля». М., 1987. Ч. 2. С. 146.
19. Горкунов Э.С., Сомова В.М., Ничипуров А.П. Магнитные свойства и методы контроля структуры и прочностных характеристик чугунных изделий (обзор) // Дефектоскопия. 1994. №10. С. 54–82.
20. 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.

21. 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. Могилев, 2000. С. 481.

22. Сандомирский С.Г. Современное состояние магнитного метода контроля механических свойств стальных и чугунных изделий машиностроения // Надежность машин и технических систем. Мн., 2001. Т.1. С. 145–146.

23. 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 // Литье и металлургия. 2002. № 3. С. 41–44.

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

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

25. Баев А.Р., Коновалов Г.Е., Майоров А.Л. и др. Методы выявления несплошностей и контроль структуры чугунов с использованием объемных и головных волн // Литье и металлургия. 2004. № 4. С. 95–100.

26. Сандомирский С. Г. Магнитный контроль физико-механических свойств изделий массового производства в движении (обзор) // Дефектоскопия. 1996. № 7. С. 25–45.

27. 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.

28. Сандомирский С.Г., Писаренко Л.З., Лукашевич С.Ф. Количественный анализ взаимосвязи микроструктуры и магнитных свойств изделий типа «ниппель 1¼» из ковкого чугуна КЧ 30-6 // Дефектоскопия. 2002. № 4. С. 18–24.