



УДК 620.179.14

Поступила 31.10.2016

ОСОБЕННОСТИ СВЯЗЕЙ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЧУГУНОВ С ИХ СТРУКТУРОЙ И МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК (ОБЗОР)

SPECIAL FEATURES OF INTERACTIONS OF MAGNETIC PROPERTIES OF CAST IRON WITH THEIR STRUCTURE AND MAGNETIC CONTROL METHODS OF STRUCTURE OF PIG-IRON CASTINGS (REVIEW)

С. Г. САНДОМИРСКИЙ, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: sand@iaph.bas-net.by

S. G. SANDOMIRSKII, Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str. E-mail: sand@iaph.bas-net.by

Проанализированы отличия магнитных свойств чугунов с разной структурой и задачи контроля структуры отливок, решение которых возможно по их магнитным параметрам.

Differences of magnetic properties of cast iron with various structure and tasks of structure control of castings by their magnetic parameter are analyzed in the article.

Ключевые слова. Структуры чугуна, магнитные свойства, магнитный структурный анализ, намагничивание, неразрушающий контроль.

Keywords. Structures of cast iron, magnetic properties, magnetic structural analysis, magnetization, nondestructive control.

Чугун является широко используемым литейным материалом [1–3]. Требуемую структуру отливок создают их химическим и фазовым составом, термической обработкой. Преимущества чугуна перед сталью – хорошие жидкотекучесть, износостойкость (вследствие собственного смазывающего действия и повышения прочности пленки смазки) и обрабатываемость резанием (графит в чугуне делает стружку ломкой). Нарушения процессов производства недопустимо изменяют структуру и свойства отливок. Измерение механических свойств и структуры [2, 4, 5] трудоемко, не производительно, требует разрушения отливки для подготовки микрошлифов или стандартных образцов и исключает ее эксплуатацию. Разнообразие структур чугуна и условий их формирования определяет разнообразие задач и физических методов неразрушающего контроля структуры чугунных отливок.

Цель обзора – обобщение основных принципов магнитного контроля структуры чугунных отливок и результатов автора по их применению.

Структуры чугуна. Чугуны – многокомпонентные железные сплавы с содержанием углерода $C \geq 2,14\%$ [1, 2]. Основными фазами металлической основы чугуна являются (рис. 1):

- Феррит: твердый раствор углерода и других элементов в α -железе (рис. 1, а). Растворимость углерода: 0,1% при 1493 °С; 0,025% при 723 °С и 0,006% при 20 °С. Различают высокотемпературный феррит, обозначаемый δ -феррит, и низкотемпературный α -феррит.

- Аустенит: твердый раствор углерода и других элементов в γ -железе (рис. 1, б). Растворимость углерода до 2,06% при 1147 °С и 0,8% при 423 °С.

- Цементит: карбид железа Fe_3C (рис. 1, в). В присутствии примесей образуется легированный цементит, например $(FeMn)_3C$, $(FeCr)_3C$, $(FeMnCr)_3C$. Растворимость углерода 6,67%.

- Перлит: эвтектоидная структура, состоящая из феррита и цементита, имеющая пластинчатую форму (рис. 1, г). Образуется из аустенита в процессе охлаждения. Для образования перлита в аустените должно быть 0,8% С. Во многих случаях получают зернистый перлит (рис. 1, д), когда зерна цементита

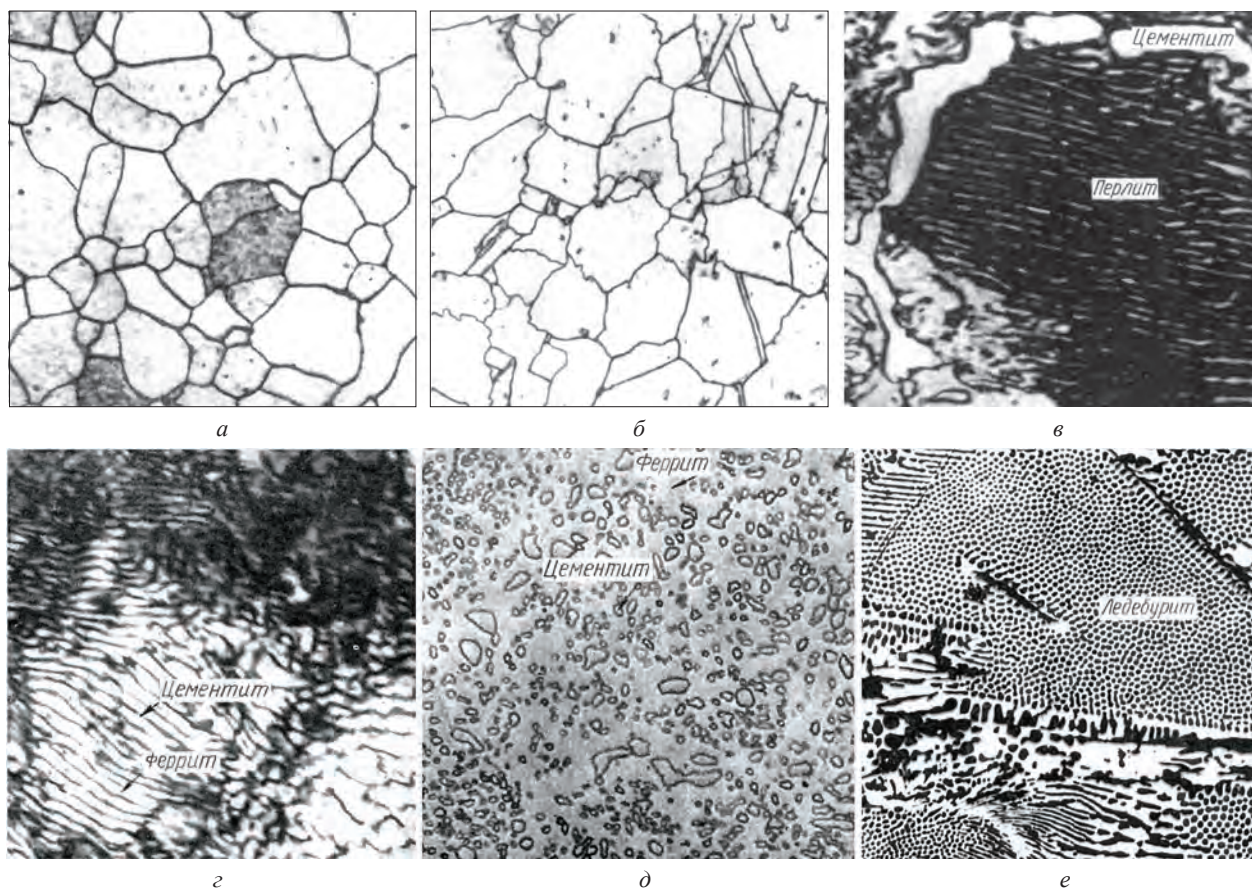


Рис. 1. Основные структуры металлической основы чугунов [2]: а – феррит (×250); б – аустенит (×250); в – цементит (×500); г – перлит пластинчатый (×1000); д – перлит зернистый (×1000); е – ледебурит (×250)

та расположены в ферритной матрице. Различают грубодифференцированный перлит (1,0 мкм), среднедифференцированный сорбитообразный перлит (0,3 мкм) и тонкодифференцированный троостит (0,15 мкм).

- Ледебурит: эвтектическая структура, состоящая из аустенита и цементита, а после охлаждения ниже 727 °С – перлита и цементита (рис. 1, е). Образуется при содержании в жидком сплаве 4,3% С. При наличии в стали значительных количеств Cr, W, Mo может образоваться при более низких концентрациях углерода.

Улучшение свойств чугуна достигают при большом содержании легирующих элементов: никеля, алюминия, меди и хрома [6]. Кроме химического состава, определяющее влияние на свойства отливок оказывает фазовый состав чугуна, формирующийся при затвердевании [1, 7]. Если образование графита исключается, то формируется смесь аустенита и цементита и чугун называют белым (БЧ) – по цвету светлых кристаллов цементита на изломе. БЧ вследствие присутствия в нем цементита обладает высокой износостойкостью, твердостью (НВ = 400–500), хрупок (относительное удлинение $\delta = 0,01\%$) и практически не поддается обработке резанием. Если жидкая фаза полностью переходит в смесь аустенита и графита, чугун называют серым (СЧ) – по цвету излома, определяемому темными кристаллами графита. В СЧ углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в виде графитовых включений. Если при кристаллизации образуются и цементит, и графит, чугун называют половинчатым. Он содержит структурные составляющие СЧ и БЧ: перлит, пластинчатый графит и участки ледебурита. Эти структуры могут образовываться в одной отливке: ускоренно охлажденная зона имеет структуру БЧ, а медленно охлажденная – структуру СЧ. Отбеленными называют отливки, поверхность которых имеет структуру белого или половинчатого, а сердцевина – серого чугуна.

На механические свойства чугуна влияет форма выделяющихся графитовых включений. Их можно рассматривать как надрезы, ослабляющие металлическую основу структуры. Чем мельче включения, чем их меньше и больше изолированность друг от друга, тем выше прочность чугуна. В зависимости от формы графита (рис. 2) и условий его образования различают следующие группы чугунов: серый, ковкий и высокопрочный с шаровидным графитом (рис. 3).

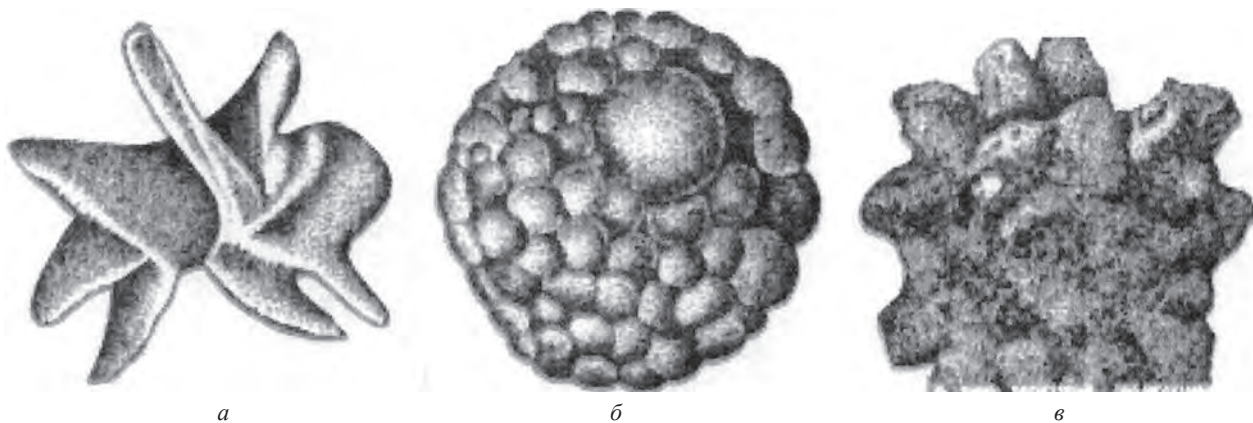


Рис. 2. Формы графитовых включений в микроструктуре чугуна: *а* – пластинчатый графит; *б* – шаровидный графит; *в* – хлопьевидный графит

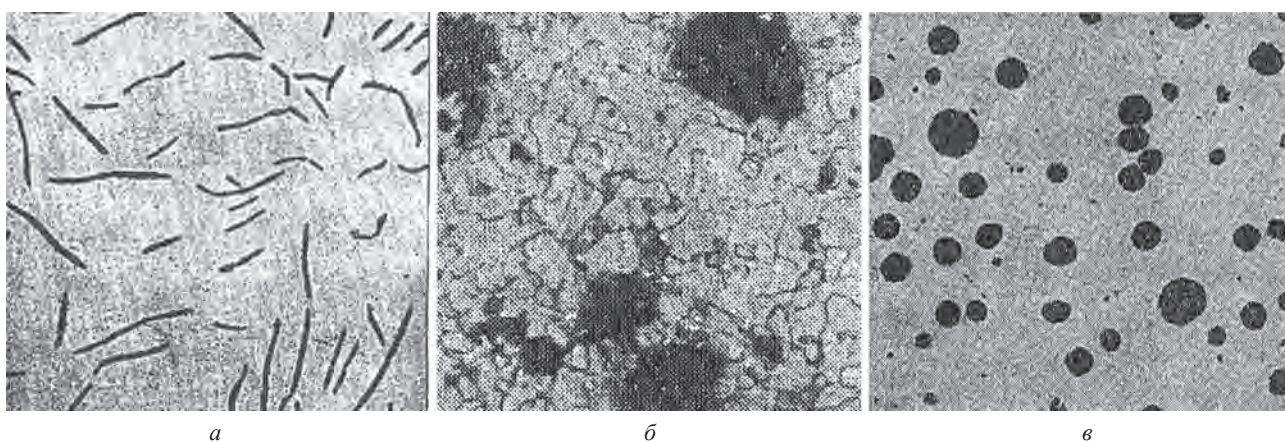


Рис. 3. Графитовые включения в микроструктуре чугуна [2]: *а* – серый ($\times 100$); *б* – ковкий ($\times 250$); *в* – высокопрочный ($\times 100$)

В сером чугуне (СЧ) графит выделяется в виде пластинчатых включений (рис. 3, *а*). Пластинки графита уменьшают сопротивление разрыву, временное сопротивление (предел прочности) σ_b и пластичность чугуна (при растяжении СЧ независимо от свойств металлической основы $\delta \leq 0,5\%$). Графитовые включения мало влияют на снижение σ_b при сжатии и твердости (НВ = 143–255), которые определяются главным образом структурой металлической основы чугуна. Нарушая сплошность металлической основы, графит делает чугун малочувствительным к внешним концентраторам напряжений (дефектам, надрезам). Поэтому СЧ имеет практически одинаковую прочность в отливках простой формы и с ровной поверхностью и сложной формы с надрезом или не обработанной поверхностью. Наибольшую прочность и износостойкость обеспечивает перлитная структура металлической основы СЧ.

Ковкий чугун (КЧ) получают длительным отжигом отливок из БЧ (рис. 4, *а*).

На первой стадии отжига (при 950–970°C) в результате распада цементита диффузионным путем образуется хлопьевидный графит (рис. 4, *б*). Затем отливки охлаждают до температур 760–720 °С (при этом происходит выделение из аустенита вторичного цементита, его распад и рост графитовых 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 (рис. 4, *в*). Такой графит меньше пластинчатого снижает прочность и пластичность металлической основы чугуна. Благодаря высокой пластичности ($\delta = 6\text{--}20\%$) и низкой твердости (НВ = 163) ферритному КЧ свойственна хорошая обрабатываемость резанием. При ускоренном охлаждении образуется перлитный КЧ, имеющий светлый излом, НВ = 241–269, умеренную пластичность ($\delta = 2\text{--}7\%$), высокую прочность и антифрикционные свойства.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧ) получают модифицированием жидкого чугуна небольшими добавками отдельных элементов (рис. 5).

Установлено [8], что если в жидкий чугун ввести слабо растворяющийся в нем металл (например, магний в количестве 0,03–0,07%) или сплав, температура кипения которого ниже температуры жидкого

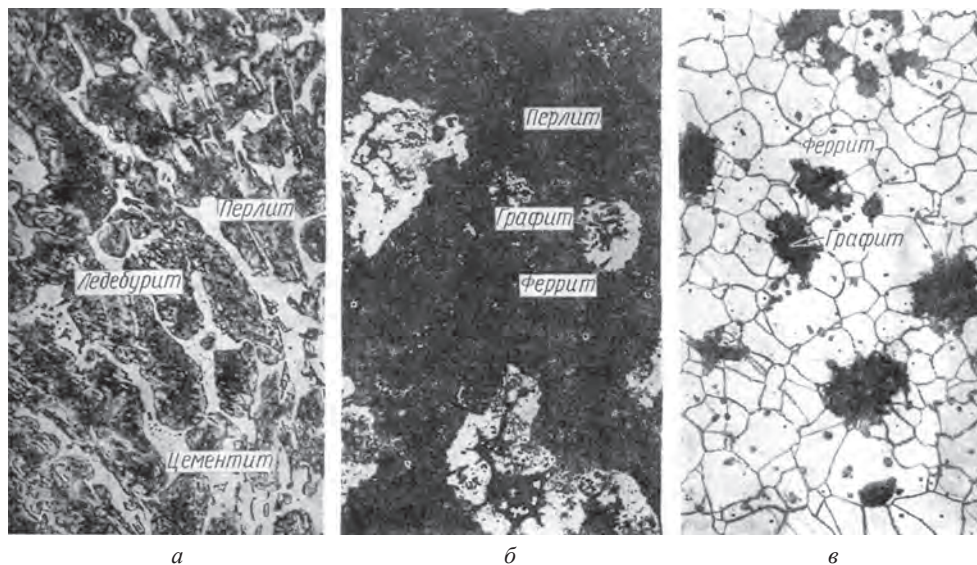


Рис. 4. Структуры чугуна в процессе получения отливок из ковкого чугуна [2]. $\times 125$: *а* – до отжига (белый доэвтектический чугун); *б* – после первой стадии графитизации; *в* – после отжига (после второй стадии графитизации)

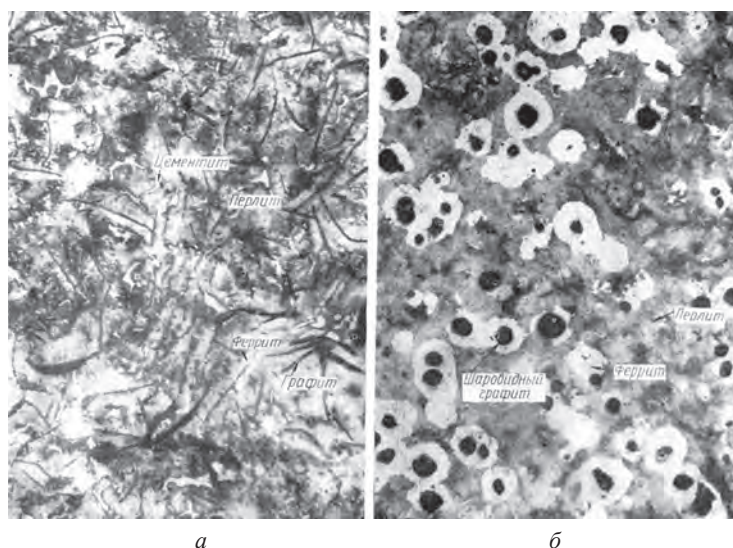


Рис. 5. Микроструктура чугуна [2]. $\times 100$: *а* – без модифицирования (микроструктура серого чугуна с пластинчатым графитом); *б* – после модифицирования лигатурой магния с ферросилицием (высокопрочный чугун: шаровидный графит, феррит и перлит)

чугуна и пары которого вступают в реакцию окисления с газами, в состав которых входит кислород, то в остатках пузырьков пара этого металла зарождается шаровидный графит. Шаровидный графит меньше, чем пластинчатый, ослабляет металлическую основу чугуна и не является активным концентратором напряжений. ВЧ имеют пластичность, прочность, износостойкость и коррозионную стойкость, близкие к свойствам углеродистой и легированной стали. При этом они сохраняют хорошие литейные свойства и обрабатываемость резанием, способность гасить вибрации, высокую износостойкость. Стоимость отливок из ВЧ на 25–50% ниже стоимости отливок и поковок из стали и КЧ. В ряде случаев оптимальное сочетание свойств обеспечивает вермикулярная (средняя между шаровой, хлопьевидной и пластинчатой) форма графитовых включений, образующаяся при некоторых 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 [9]. Разнообразие физико-механических свойств чугунов позволяет выбрать материал для создания разных отливок с учетом режимов их дальнейшей обработки и эксплуатации. Но 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

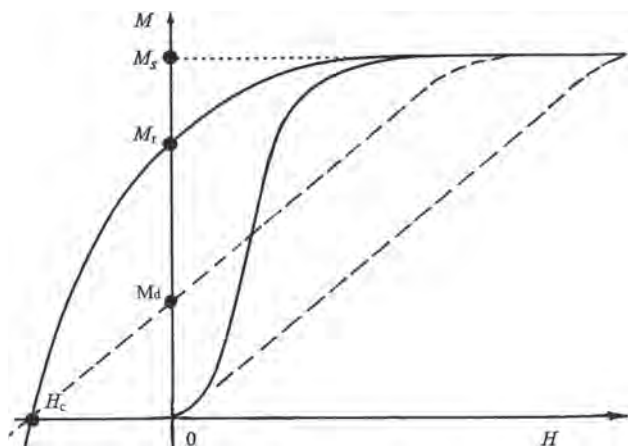


Рис. 6. Основная кривая намагничивания и нисходящая ветвь предельной петли магнитного гистерезиса ферромагнитного материала и тела (пунктир)

структур чугунов не является заведомо «бракованной» или «годной», а становится таковой с учетом задачи изготовления и последующей эксплуатации отливки.

Магнитный контроль чугунных отливок основан на различии магнитных свойств (рис. 6) структурных составляющих чугуна [10–13]. Нет закономерности между количеством углерода и магнитными свойствами чугуна, так как определяющее влияние на них оказывает состояние, а не содержание углерода в чугуне. Обобщение диапазонов изменения коэрцитивной силы H_c , остаточной намагниченности M_r , намагниченности M_s технического насыщения и максимальной магнитной проницаемости μ_m белого, серого, ковкого и высокопрочного чугунов при разных структурах металлической матрицы приведено в табл. 1.

Таблица 1. Магнитные свойства чугунов с разной структурой

Тип чугуна	Тип металлической основы	H_c , кА/м	μ_m	M_s , кА/м	M_r , кА/м
Белый чугун (БЧ)		1,04–1,28	180–200	1035	400–440
Серый чугун (СЧ)	Ферритная	0,2–0,4	600–1500	1433	240–440
	Перлитная	0,56–1,06	200–450	1393	320–560
Высокопрочный чугун (ВЧ)	Ферритная	0,12–0,2	1600–2400	1513	240–480
	Перлитная	0,4–0,88	300–600	1473	400–640
Ковкий чугун (КЧ)	Ферритная	0,12–0,2	1500–2300	1433	440–560
	Перлитная	0,4–0,88	300–800	1393	480–600

Наибольшую H_c и наименьшие μ_m и M_s имеет БЧ. Увеличение графитизации приводит к снижению H_c и росту μ_m , особенно при распаде последних остатков цементита. Это объясняется увеличением в структуре чугуна мягкой магнитной компоненты – феррита и снижением внутренних напряжений (графит создает меньшие структурные микронапряжения, чем цементит). Кроме того, уменьшение объема, занимаемого графитом, по сравнению с объемом исходного цементита, приводит к уменьшению внутреннего размагничивания, так как графит и цементит можно рассматривать как немагнитные включения, являющиеся местами образования внутренних размагничивающих полей. Исследования влияния формы магнитных включений показали, что чем она компактнее, тем мягче в магнитном отношении чугун. Поэтому ВЧ и КЧ с шаровидной и хлопьевидной формами графита имеют большую μ_m и меньшую H_c по сравнению с СЧ той же металлической основы. Различие в химическом составе чугунов вызывает разброс магнитных характеристик. Но можно говорить об однозначной зависимости H_c и μ_m от степени графитизации, поскольку влияние соотношения графита и цементита на эти параметры больше, чем других факторов.

При выборе магнитного параметра, оптимального для магнитного контроля структуры чугунных отливок, следует учесть, что намагничивание и формирование остаточной намагниченности отливки происходит под влиянием ее размагничивающего фактора или размагничивающего фактора намагниченного участка отливки [14]. Поэтому остаточная намагниченность M_d отливки, остаточный магнитный поток Φ_d в отливке, параметры поля от остаточной намагниченности локально намагниченного участка отливки и его градиент ∇H становятся пропорциональны коэрцитивной силе H_c материала отливки (рис. 6).

Среди приборов, основанных на этом принципе и специально разработанных для магнитной сортировки отливок по структуре, выделим магнитные анализаторы качества структуры изделий МАКСИ-П, МАКСИ-Р и магнитный сортировщик МС [12, 13, 15, 16] (рис. 7). Принцип действия приборов МАКСИ-П и МАКСИ-Р заключается в бесконтактном намагничивании изделия в открытой магнитной цепи при его свободном падении сквозь область с намагничивающим полем постоянной напряженности H_e и измерении величины Φ_d остаточного магнитного потока в изделии при его движении сквозь об-



а

б



в

Рис. 7. Внешний вид приборов для магнитного контроля структуры чугуных отливок: а – МАКСИ-П; б – МАКСИ-Р; в – МС-3

ласть, где намагничивающее поле экранировано или скомпенсировано. В приборе МАКСИ-П намагничивание осуществляется в стационарном поле двухполюсной магнитной системы напряженностью около 46 кА/м, ортогональном направлению движения изделия. В приборе МАКСИ-Р максимальная напряженность намагничивающего поля, параллельного направлению движения изделий, равна 37 кА/м. При движении намагниченное изделие индуцирует в измерительном преобразователе специальной конструкции сигнал, вольт-секундная площадь полуволны которого измеряется (в мкВб) и индицируется на двухразрядном цифровом табло прибора. Диапазон измерения Φ_d , мкВб: 0,01–6,00 (показания $\Phi = 100$ соответствуют 0,6 мкВб). Относительная погрешность не более $\pm 1,5\%$. Результат измерения сравнивается с предварительно установленными пределами годности изделия по измеряемому параметру. По результату сравнения исполнительный механизм осуществляет сортировку изделий на годные и брак с производительностью до 2 изделий в секунду. В приборе «Сортировщик магнитный МС» осуществлена современная реализация метода точечного полюса [16]. Контроль осуществляют по результату измерения градиента поля от остаточной намагниченности изделия, локально намагниченного полюсом постоянного магнита.

Таким образом, сортировка чугунов с разной структурой по результату измерения их магнитных свойств, прежде всего, связанных с коэрцитивной силой, может быть рекомендована в следующих основных случаях.

Белый чугун от чугунов всех других типов может быть выделен по результату измерения H_c или связанной с ней остаточной намагниченности M_d отливки после намагничивания ее до технического насыщения. Различие этих параметров БЧ и ферритных чугунов других типов составляет от 3 до 10 раз, что практически исключает их перепутывание при контроле. Различие H_c и M_d БЧ и перлитных КЧ и ВЧ также достаточно для их уверенной сортировки (1,2–3,0 раза). Применение магнитного контроля качества отжига отливок из БЧ на КЧ – одно из наиболее удачных и надежных использований магнитного неразрушающего контроля [9, 10]. Причем теоретически показано и экспериментально подтверждено (рис. 8), что в полях, не доводящих отливки с большим размагничивающим фактором до технического насыщения, наблюдается более высокая (на 20–30%) чувствительность остаточной намагниченности M_d отли-

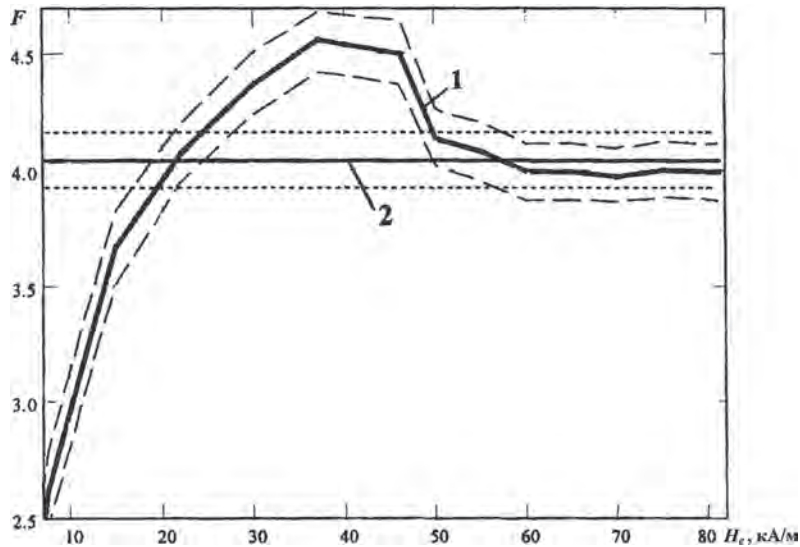


Рис. 8. Зависимость отношения F остаточной намагниченности M_d отливок «ниппель 1/4» из ВЧ к M_d тех же отливок из феррито-перлитного КЧ (1) от напряженности H_e намагничивающего поля; 2 – F после намагничивания отливок в пермеаметре. Пунктирные линии – диапазон возможной погрешности измерения и расчета F

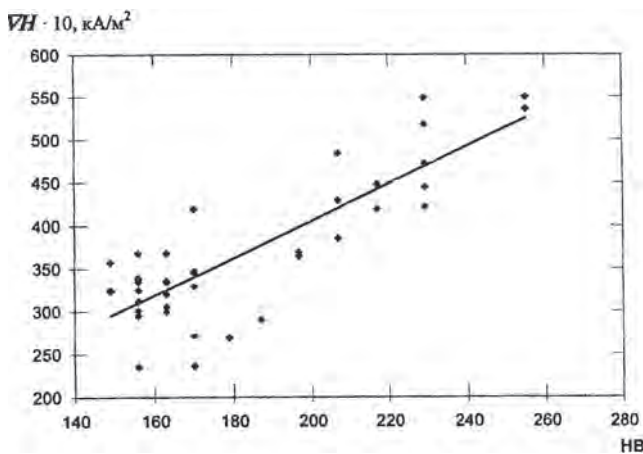


Рис. 9. Зависимость показаний VH прибора МС от твердости НВ заготовок из СЧ18

вок к структуре их материала, чем при намагничивании до насыщения [17]. Поэтому напряженность H_e намагничивающего поля при сортировке отливок с большим размагничивающим фактором рекомендовано устанавливать в пределах 20–50 кА/м [18].

По измерению H_c или M_d перлитный и ферритный чугуны всех типов могут быть отбракованы друг от друга (рис. 9).

Решена задача определения количественного соотношения содержания перлита и феррита в КЧ на основе измерения пропорционального M_d остаточного магнитного потока Φ_d в отливках с большим размагничивающим фактором (рис. 10) [19].

При определении соотношения содержания перлита и феррита в ВЧ следует учитывать, что повы-

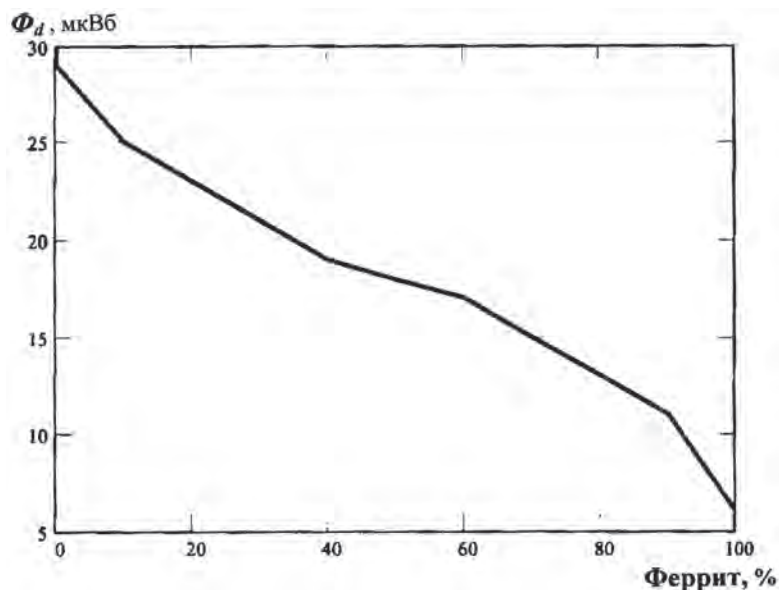


Рис. 10. Зависимость остаточного магнитного потока Φ_d в отожженной отливке «ниппель 1/4» из КЧ после намагничивания в поле 46 кА/м от содержания феррита в металлической матрице отливки

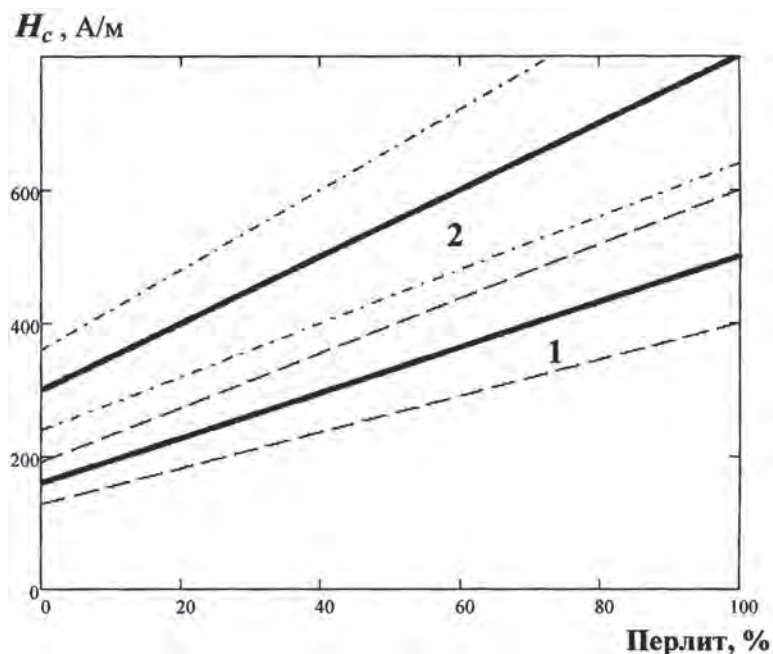


Рис. 11. Зависимость коэрцитивной силы H_c ВЧ (1) и СЧ (2) от содержания перлита в металлической матрице. Оценка по результатам исследований [20]. Пунктир и штрихпунктир – диапазоны вероятного изменения H_c на основании данных табл. 1

шение H_c , свойственное повышению содержания перлита в металлической матрице чугуна, может быть вызвано увеличением доли пластинчатых графитовых включений в чугуне при снижении доли шаровидных включений графита (рис. 11) [20].

В [20] показано, что при одинаковой форме включений графита изменение содержания перлита в металлической матрице ВЧ и СЧ от 0 до 100% в 2,8 раза повышает показания Φ_d и ∇H приборов МАКСИ и МС, пропорциональные H_c материала отливок. Значения параметров Φ_d и ∇H образцов со структурой ВЧ в среднем в 1,6 раза меньше, чем для образцов со структурой СЧ при одинаковом соотношении феррита и перлита в металлической матрице. Полученные результаты наряду с данными табл. 1 о диапазоне изменения магнитных свойств чугунов с разной структурой позволяют дать приведенную на рис. 11 оценку изменения H_c отливок при изменении соотношения ВЧ и СЧ в их составе. По измерению H_c и связанных с ней параметров можно уверенно выделить [20] от других типов чугуна лишь ферритный ВЧ с содержанием перлита в металлической матрице до 20% (рис. 11). H_c таких чугунов не более 250 А/м. СЧ при содержании перлита в металлической матрице свыше 50% имеет $H_c \geq 600$ А/м и может быть отбракован от ВЧ по показаниям коэрцитивно чувствительных приборов.

Перлитный ВЧ по результату измерения H_c может быть отбракован от СЧ только при гарантии сохранения неизменной металлической основы чугуна. Для отбраковки перлитного ВЧ от ферритного СЧ рекомендовано измерение H_c и не магнитного параметра, например, скорости звука [20]. По [21] измеряют скорость V_3 звука и магнитный параметр Φ_3 эталонной отливки, заведомо годной по содержанию шаровидных включений и перлита в металлической матрице, измеряют скорость V_C звука в отливке и ее магнитный параметр Φ_C , определяют разницу $V_C - V_3$ и $\Phi_C - \Phi_3$, по которым находят разницу $\Delta\Pi$ в содержании шаровидных включений и $\Delta\Pi$ в содержании перлита в металлической матрице сортируемой и эталонной отливок. Сортировку отливки осуществляют по результату сравнения значений $\Delta\Pi$ и $\Delta\Pi$ с их допустимыми отклонениями. При этом в качестве магнитного параметра отливки измеряют H_c или пропорциональный ей магнитный параметр, а $\Delta\Pi$ и $\Delta\Pi$ определяют по формулам:

$$\Delta\Pi = 4,27\Delta V - 0,09125 \Delta\Phi, \quad \Delta\Pi = 2,44\Delta V + 0,305 \Delta\Phi,$$

где $\Delta V = (V_C - V_3)/V_3$ и $\Delta\Phi = (\Phi_C - \Phi_3)/\Phi_3$ – относительные изменения скорости звука и магнитного параметра в сортируемой отливке по сравнению с эталонной.

Эффективность способа [21] иллюстрируется примером его реализации для сортировки по структуре отливок сложной формы (длиной 70 мм, поперечным размером до 38 мм), изготавливаемых на одном из литейных заводов из высокопрочного чугуна ВЧ50. В качестве магнитного параметра использован остаточный магнитный поток Φ , сохраняющаяся в них после намагничивания до состояния, близкого

к техническому насыщению. Измерения Φ проведены анализатором магнитным МАКСИ-Р. Скорость V звука в отливках измерена ультразвуковым толщиномером фирмы «Kraut Kramer».

Параметр Φ отливки, заведомо годной по содержанию шаровидных включений и перлита в металлической матрице, составил $\Phi_{\Sigma} = 220$, а скорость звука $V_{\Sigma} = 5575$ м/с. После измерений Φ_{Σ} и V_{Σ} эталонная отливка была разрушена для изготовления микрошлифа и определения структуры по [5]. Было установлено, что в микроструктуре эталонной отливки содержание шаровидного графита – 100%, а содержание перлита – 50%. После этого пять отливок из промышленной партии были рассортированы по структуре способом [21]. Результаты определения разницы ΔIII и ΔI сортируемой и эталонной отливок приведены в табл. 2. Критерием годности сортируемых отливок (по техническим условиям производства отливок) было снижение содержания шаровидных включений и перлита в отливках не более, чем на 10% по сравнению с эталонной отливкой. Результаты сортировки отливок по этому критерию годности приведены в табл. 2. После сортировки отливок для проверки результатов сортировки структура отливок была определена по стандартной методике [5]. Результаты определения структуры отливок по стандартной методике также приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Результаты сортировки отливок по предложенному способу и стандартной разрушающей методике [5]

Номер изделия	Результаты измерений		Результаты сортировки					
	V_c , м/с	$\Phi_c \cdot 10^{-3}$ мкВБ	предложенным способом			по стандартной методике		
			$\Delta III, \times 100\%$	$\Delta I, \times 100\%$	брак, годное	$\Delta III, \times 100\%$	$\Delta I, \times 100\%$	брак, годное
1	4960	125	-43	-40	брак	-50	-20	брак
2	5540	170	-1,5	-8	годное	0	-5	годное
3	5684	268	+6,4	+12	годное	0	+20	годное
4	5491	128	-2,6	-17	брак	0	-25	брак
5	5412	111	-8	-22	брак	-10	-37	брак

Результаты (табл. 2) сортировки отливок способом, приведенным в [21], показывают, что они совпадают с результатами сортировки отливок по стандартной методике [5]. Количественно результаты определения разницы ΔIII в содержании шаровидных включений и разницы ΔI в содержании перлита в металлической матрице сортируемой и эталонных отливок по предложенной и стандартной методикам совпадают в пределах погрешности и субъективности определения этих параметров по стандартной методике. Таким образом, способ [21] повышает достоверность сортировки отливок из ВЧ по структуре до уровня достоверности стандартной разрушающей методики. Кроме того, он обеспечивает сортировку отливки по параметрам, усредненным по всему объему отливки, а не по ее локальным участкам, как у стандартной методики.

Проведенный анализ показал, что разделение чугуновых отливок с разной структурой друг от друга по результату измерения магнитных параметров может быть рекомендовано:

- для выделения БЧ от чугунов всех других типов (в том числе для контроля качества отжига БЧ на КЧ, контроля наличия отбела на поверхности отливок из СЧ);
- для разбраковки друг от друга перлитного и ферритного чугунов всех типов (имеется возможность количественной оценки отношения феррита и перлита в КЧ и ВЧ);
- для контроля формы графитовых включений в чугуне при постоянной структуре металлической матрицы. При возможности одновременного изменения структуры металлической матрицы и появления пластинчатого графита в ВЧ возможно уверенное выделение ферритного ВЧ от СЧ;
- для отбраковки перлитного ВЧ от ферритного СЧ следует рекомендовать одновременное измерение H_c и скорости звука [21].

Но потребности производства диктуют новые задачи. Так, при отжиге на ковкий чугун отливок из белого чугуна на поверхности отливки может сохраниться отбеленный слой (рис. 12).

Такие отливки при магнитном контроле их структуры, как правило, отбраковываются [13, 17]. Но в случае, когда толщина отбеленного слоя меньше, чем слой, удаляемый при предварительной обточке отливки, отливка с поверхностным отбеленным слоем является годной для механической обработки. При существующем методе сортировки значительная часть годных для механической обработки отливок направляется на переплавку. Это приводит к неоправданному перерасходу материальных и трудовых ресурсов.

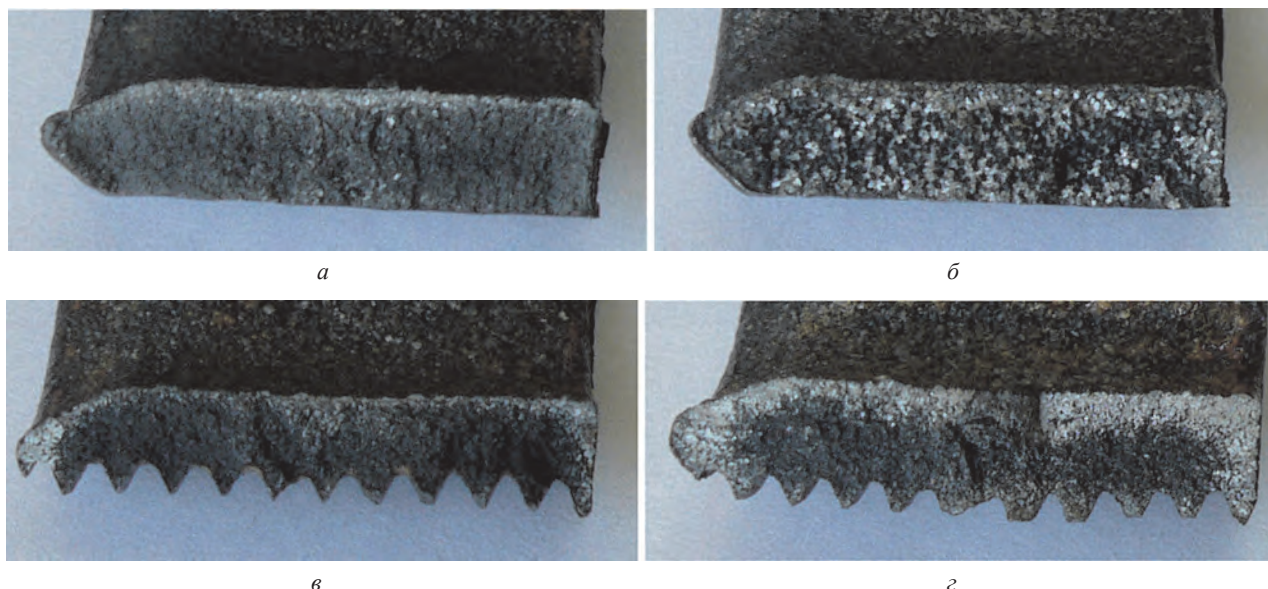


Рис. 12. Изломы ниппелей из ковкого чугуна КЧ30-6. $\times 3$: *а* – ковкий чугун по всему объему отливки; *б* – вкрапления белого чугуна по всему объему отливки; *в*, *г* – отбеленный слой на поверхности отливки

Эксперименты по исследованию влияния толщины и магнитных свойств материала слоев на намагничивание двухслойного изделия [22] трудоемки и не позволяют определить пороговую намагниченность для разбраковки отливок с допустимой толщиной отбеленного слоя.

Основой расчетной модели намагничивания двухслойной отливки являются [23, 24]:

1. Результаты (см. табл. 1) измерения магнитных свойств (H_c , M_r и M_s чугунов с разной структурой).
2. Формулы [25] для расчета намагниченности материала на частных петлях магнитного гистерезиса по H_c , M_r и M_s . Разработанная методика позволяет рассчитать остаточную намагниченность M_d стального изделия, намагничиваемого в разомкнутой магнитной цепи полем напряженностью H_e по H_c , M_s и M_r материала и размагничивающему фактору N изделия. Следует обосновать правомерность использования этих формул для описания намагничивания чугунов с учетом изменений связей между магнитными параметрами чугуна по сравнению со сталью под влиянием внутреннего размагничивания [26].
3. Формулы для расчета размагничивающего фактора тел разной формы [14] и внутреннего коэффициента размагничивания материалов с немагнитными включениями [27].

Аналитическое описание намагничивания и формирования остаточной намагниченности отливок с неоднородной по слоям структурой будет использовано для повышения селективности и достоверности магнитного контроля структуры отливок.

Литература

1. Бунин К. П. Строение чугуна / К. П. Бунин, Ю. Н. Таран. М.: Металлургия, 1972. 160 с.
2. Болохвинов Н. Ф. Атлас макро- и микроструктур металлов и сплавов / Н. Ф. Болохвинов, Е. Н. Болохвинова. Изд. 2-е, перераб. и допол. М.: МАШГИЗ, 1959. 88 с.
3. Щербединский Г. В. Чугун как перспективный материал 21 столетия / Г. В. Щербединский // Материаловедение и термическая обработка металлов. 2005. № 7. С. 83–93.
4. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман. М., 1974. Т. 1, 2.
5. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. ГОСТ 3443-87. 2005. 42 с.
6. Комаров О. С. Совершенствование технологии получения отливок из высокохромистого чугуна / О. С. Комаров. М.: Новое знание, 2014. 152 с.
7. Анисович А. Г. Микроструктуры черных и цветных металлов / А. Г. Анисович, А. А. Андрушевич. Мн.: Беларуская навука, 2015. 131 с.
8. Горшков А. А. О механизме образования шаровидного графита / А. А. Горшков // Литейное производство. 1955. № 3. С. 17–21.
9. Русин П. И. Магнитная структуроскопия термически обработанного чугуна / П. И. Русин, Л. А. Гофман, М. А. Капустянский. Ростов-на-Дону: Ростовский университет, 1978. 141 с.
10. Карамара А. Основные положения магнитных методов контроля состояния и качества чугунных отливок / А. Карамара // 25-й междунар. конгресс литейщиков. М., 1961. С. 454–475.
11. Горкунов Э. С. Магнитные свойства и методы контроля структуры и прочностных характеристик чугунных изделий (Обзор) / Э. С. Горкунов, В. М. Сомова, А. П. Ничипурук // Дефектоскопия. 1994. № 10. С. 54–82.
12. Сандомирский С. Г. Возможности и ограничения магнитного контроля структуры чугунных отливок (обзор) / С. Г. Сандомирский // Литье и металлургия. 2006. № 2(38). Ч. 1. С. 118–123.

13. Сандомирский С. Г. Возможности количественного контроля структурных параметров чугуновых отливок магнитным методом / С. Г. Сандомирский // *Металлургия*. 2009. № 2. С. 28–34.
14. Сандомирский С. Г. Расчет и анализ размагничивающего фактора ферромагнитных тел / С. Г. Сандомирский. Минск: Беларуская навука, 2015. 244 с.
15. Сандомирский С. Г. Анализ предпосылок количественного контроля структуры изделий из высокопрочного чугуна магнитным методом / С. Г. Сандомирский, В. Л. Цукерман, Л. З. Писаренко // *Литье и металлургия*. 2005. № 2. Ч. 2. С. 143–148.
16. Сандомирский С. Г. Применение полюсного намагничивания в магнитном структурном анализе (обзор) // *Дефектоскопия*. 2006. № 9. С. 36–64.
17. Сандомирский С. Г. Оптимизация режимов магнитного контроля структуры отливок из ковкого чугуна / С. Г. Сандомирский // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2009. № 8. С. 39–43.
18. Способ магнитного контроля структуры материала с размагничивающим фактором более 0,04: пат. на изобретение 13520 Респ. Беларусь, МПК (2009) G01N 27/72 / С. Г. Сандомирский; заявитель Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси». № а 20081193; заявл. 19.09.2008; опубл. 30.08.2010. // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. 2010. № 4.
19. Сандомирский С. Г. Количественный анализ взаимосвязи микроструктуры и магнитных свойств изделий типа «нипель 1/4» из ковкого чугуна КЧ30-6 / С. Г. Сандомирский, Л. З. Писаренко, С. Ф. Лукашевич // *Дефектоскопия*. 2002. № 4. С. 18–24.
20. Сандомирский С. Г. Влияние структуры металлической матрицы высокопрочного чугуна на коэрцитивно чувствительный магнитный параметр и скорость звука / С. Г. Сандомирский, В. Л. Цукерман // *Литье и металлургия*. 2013. № 2. С. 41–45.
21. Способ сортировки отливок из высокопрочного чугуна по содержанию в их структуре шаровидных графитовых включений и перлита: пат. на изобретение 19548 Респ. Беларусь, МПК G01N 27/72 (2006.01) / С. Г. Сандомирский, В. Л. Цукерман; заявитель Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси». № а 20130563; заявл. 29.04.2013; опубл. 30.10.2015. // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці*. 2015. № 5.
22. Особенности распределения остаточной индукции в двухслойном ферромагнитном цилиндре / С. Г. Сандомирский [и др.] // *Дефектоскопия*. 1997. № 10. С. 34–41.
23. Сандомирский С. Г. Физические основы методики расчета намагничивания двухслойных чугуновых отливок / С. Г. Сандомирский // *Международ. науч.-техн. конф. «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии»*. Могилев, Белорусско-Российский университет. 14–15 апреля 2016. С. 275–276.
24. Сандомирский С. Г. Магнитные методы контроля чугуновых отливок с однородной структурой и физические основы расчета намагничивания двухслойных отливок / С. Г. Сандомирский // *Литейное производство и металлургия* 2016. Беларусь: Тр. 24-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 октября 2016. С. 107–114.
25. Сандомирский С. Г. Расчет кривой намагничивания и частных петель гистерезиса ферромагнитных материалов по основным магнитным параметрам / С. Г. Сандомирский // *Электричество*. 2010. № 1. С. 61–64.
26. Сандомирский С. Г. Изменение связи между магнитными параметрами чугуна по сравнению со сталью под влиянием внутреннего размагничивания / С. Г. Сандомирский // *Литье и металлургия*. 2014. № 4. С. 105–108.
27. Сандомирский С. Г. Оценка внутреннего коэффициента размагничивания чугунов по результатам измерения их остаточной намагниченности / С. Г. Сандомирский // *Металлы*. 2013. № 3. С. 88–94.

References

1. Bunin K. P. *Stroenie chuguna* [The structure of cast iron]. Moscow, Metallurgija Publ., 1972, 160 p.
2. Bolochvinov N. F., Bolochvinova E. N. *Atlas macro- i mikrostruktur of metallov i splavov* [Atlas macro- and microstructures of metals and alloys]. Izd. 2, Moscow, MACHGIZ Publ., 1959. 88 p.
3. Shherbedinskij G. V. Chugun kak perspektivnyj material 21 stoletija [Cast as a promising material of the 21st century]. *Materialovedenie i termicheskaja obrabotka metallov = Materials Science and heat treatment of metals*, 2005, no. 7, pp. 83–93.
4. Fridman Ja. B. *Mehaničeskije svojstva metallov* [Mechanical properties of metals]. / Moscow, 1974, vol. 1, 2.
5. *Otlivki iz chuguna s razlichnoj formoj grafita. Metody opredelenija struktury* [Cast iron castings with graphite of different form]: GOST 3443–87. Moscow, Standartinform, 2005, 42 p.
6. Komarov O. S. *Sovershenstvovanie tehnologii poluchenija otlivok iz vysokohromistogo chuguna* [Improving the technology of high chrome cast iron castings from]. Moscow, Novoe znanie Publ., 2014, 152 p.
7. Anisovich A. G., Andrushevich A. A. *Mikrostruktury chernyh i cvetnyh metallov* [The microstructure of ferrous and nonferrous metals]. Minsk, Belarusskaja navuka Publ., 2015, 131 p.
8. Gorshkov A. A. O mehanizme obrazovaniya sharovidnogo grafita [On the mechanism of formation of spherical graphite]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1955, no. 3, pp. 17–21.
9. Rusin P. I., Gofman L. A., Kapustjanskij M. A. *Magnitnaja strukturoskopija termicheski obrabotannogo chuguna* [Magnetic structurescopy thermally treated iron]. Rostov-na-Donu: Rostovskij universitet Publ., 1978, 141 p.
10. Karamara A. Osnovnye položeniya magnitnyh metodov kontrolja sostojaniya i kachestva chugunnyh otlivok [The main provisions of the magnetic state and quality control methods iron castings]. *Trudy 25-j mezhdunarodnyj kongress litejshhikov = Proceedings of the 25th International Congress of founders*. Moscow, 1961, pp. 454–475.
11. Gorkunov Je. S., Somova V. M., Nichipuruk A. P. Magnitnye svojstva i metody kontrolja struktury i prochnostnyh harakteristik chugunnyh izdelij (Obzor) [Magnetic properties and methods of control structure and strength properties of cast iron products (Overview)]. *Defektoskopija = Russian journal of nondestructive testing*, 1994, no. 10, pp. 54–82.
12. Sandomirskij S. G. Vozmozhnosti i ogranichenija magnitnogo kontrolja struktury chugunnyh otlivok (obzor) [The possibilities and limitations of magnetic control structure of iron castings (review)]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2006, no. 2(38), vol. 1, pp. 118–123.
13. Sandomirskij S. G. Vozmozhnosti kolichestvennogo kontrolja struktury chugunnyh otlivok magnitnym metodom [The possibilities of quantitative control of the structural parameters of iron castings magnetic method]. *Metallurgija = Metallurgy*, 2009, no. 2, pp. 28–34.

14. **Sandomirskij S. G.** *Raschet i analiz razmagnichivajushhego faktora ferromagnitnyh tel* [The calculation and analysis of the demagnetization factor of ferromagnetic bodies]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2015, 244 p.
15. **Sandomirskij S. G., Cukerman V. L., Pisarenko L. Z.** Analiz predposylok kolichestvennogo kontrolja struktury izdelij iz vysokoprochnogo chuguna magnitnym metodom [Analysis of quantitative control of products preconditions structure of ductile iron magnetic method]. *Lit'e i metallurgija = Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2005, no. 2, vol. 2, pp. 143–148.
16. **Sandomirskij S. G.** Primenenie poljusnogo namagnichivaniya v magnitnom strukturnom analize (obzor) [Application pole magnetization in the magnetic structural analysis (review)]. *Defektoskopija = Russian journal of nondestructive testing*, 2006, no. 9, pp. 36–64.
17. **Sandomirskij S. G.** Optimizacija rezhimov magnitnogo kontrolja struktury otlivok iz kovkogo chuguna [Optimization of modes of magnetic control structure castings made of ductile cast iron]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov = Factory laboratory. Diagnosis materials*, 2009, no. 8, pp. 39–43.
18. **Sandomirskij S. G.** Sposob magnitnogo kontrolja struktury materiala s razmagnichivajushhim faktorom bolee 0,04 [A method of controlling the magnetic structure of the material with the demagnetizing factor of more than 0.04]. *Patent RB*, no. 13520, 2010.
19. **Sandomirskij S. G., Pisarenko L. Z., Lukashevich S. F.** Kolichestvennyj analiz vzaimosvjazi mikrostruktury i magnitnyh svojstv izdelij tipa «nippel' 1¼» iz kovkogo chuguna KCh 30–6 [Quantitative analysis of the relationship of microstructure and magnetic properties of the «nipple 1¼» of products from malleable cast iron CN 30–6]. *Defektoskopija = Russian journal of nondestructive testing*, 2002, no. 4, pp. 18–24.
20. **Sandomirskij S. G., Cukerman V. L.** Vlijanie struktury metallicheskoj matricy vysokoprochnogo chuguna na kojercitivno chuvstvitel'nyj magnitnyj parametr i skorost' zvuka [Influence of the structure of the metal matrix ductile iron on the magnetic coercive sensitive parameter and the speed of sound]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 2, pp. 41–45.
21. **Sandomirskij S. G., Cukerman V. L.** Sposob sortirovki otlivok iz vysokoprochnogo chuguna po sodержaniju v ih strukture sharovidnyh grafitovyh vkljuchenij i perlita [sorting method castings from nodular iron content in the structure of spherical graphite inclusions and perlite]. *Patent RB*, no. 19548, 2015.
22. **Sandomirskij S. G., Delendik M. N., Sandomirskaja E. G., Gorbash V. G.** Osobennosti raspredelenija ostatochnoj indukcii v dvuhslojnom ferromagnitnom cilindre [Features of the residual induction in the two-layer ferromagnetic cylinder]. *Defektoskopija = Russian journal of nondestructive testing*, 1997, no. 10, pp. 34–41.
23. **Sandomirskij S. G.** Fizicheskie osnovy metodiki rascheta namagnichivaniya dvuhslojnyh chugunnyh otlivok [Physical basis of calculation methods of double-layer magnetization of iron castings]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskaja konferencija «Materialy, oborudovanie i resursoberegajushhie tehnologii» = «Materials, equipment and resource-saving technologies»*. Mogilev, BRU, 2016, pp. 275–276.
24. **Sandomirskij S. G.** Magnitnye metody kontrolja chugunnyh otlivok s odnorodnoj strukturoj i fizicheskie osnovy rascheta namagnichivaniya dvuhslojnyh otlivok [Magnetic methods of control of iron castings with a homogeneous structure and the physical basis of the calculation of two-layer magnetization castings]. *Trudy 24-j mezhd. nauchno-tehn. konf. «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2016. Belarus» = Foundry and Metallurgy 2016. Belarus*, 2016, pp. 107–114.
25. **Sandomirskij S. G.** Raschet krivoj namagnichivaniya i chastnyh petel' gisterezisa ferromagnitnyh materialov po osnovnym magnitnym parametram [The calculation of the magnetization curve and minors hysteresis loop of ferromagnetic materials on the basic magnetic parameters]. *Jelektrichestvo = Electricity*, 2010, no. 1, pp. 61–64.
26. **Sandomirskij S. G.** Izmenenie svjazi mezhdru magnitnymi parametrami chuguna po sravneniju so stal'ju pod vlijaniem vnutrennego razmagnichivaniya [Changing the relationship between magnetic iron parameters in comparison with the steel under the influence of internal demagnetization]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2014, no. 4, pp. 105–108.
27. **Sandomirskij S. G.** Ocenka vnutrennego kojefficienta razmagnichivaniya chugunov po rezul'tatam izmerenija ih ostatochnoj namagnichennosti [Estimation of the internal demagnetizing factor of cast iron from its measured remanent magnetization]. *Metally = Russian Metallurgy (Metally)*, 2013, no. 3, pp. 88–94.