



The physical principles and technical decisions, providing possibility of guaranteeing of the target structure of quantity-produced castings of malleable iron are generalized according to the results of automated control of their stopping magnetization.

С. Г. САНДОМИРСКИЙ, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

УДК 620.179.14

МЕТОДИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАНОЙ СТРУКТУРЫ ОТЛИВОК МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ИЗ КОВКОГО ЧУГУНА

Введение. Чугун – широко используемый и перспективный литейный материал [1, 2]. Его преимущества – хорошие жидкотекучесть, износостойкость (вследствие собственного смазывающего действия и повышения прочности пленки смазки) и обрабатываемость резанием (графит в составе чугуна делает стружку ломкой). Требуемая структура отливок обеспечивается заданием их химического и фазового состава, режимами термической обработки.

Несмотря на большую энергоемкость длительного отжига, одним из распространенных материалов для изготовления тонкостенных деталей (при сечении отливки до 50 мм) остается ковкий чугун (КЧ). Его получают отжигом отливок из белого чугуна (БЧ). На первой стадии отжига (при 950–970 °С) в результате распада цементита диффузионным путем образуется хлопьевидный графит. Затем отливки охлаждают до температур 760–720 °С (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. Из ферритных КЧ изготавливают детали, эксплуатируемые при высоких динамических и статических нагрузках. Благодаря высокой пластичности ($\delta = 6 - 20\%$) и низкой твердости (НВ = 163) ферритному КЧ свойственна хорошая обрабатываемость резанием. При ускорен-

ном охлаждении образуется перлитный КЧ, имеющий светлый излом, высокую прочность, твердость НВ = 241 – 269, умеренную пластичность ($\delta = 2 - 7\%$) и высокие антифрикционные свойства.

В Республике Беларусь крупнейшим производителем отливок массового производства из КЧ является ОАО «МЗОО» – крупнейший в СНГ производитель отопительных радиаторов. Важной деталью радиатора, соединяющей его секции между собой, является «ниппель 1¼», отливка которого представляет собой полый цилиндр длиной 30 мм, наружным диаметром 43 мм и толщиной стенки 5 мм. На наружной поверхности отливки после обточки на станках-автоматах осуществляется нарезка левой и правой резьбы. Требования к прочности и обрабатываемости детали обуславливают необходимость изготовления ее из ферритного КЧ30-6. Нарушения химического состава отливок, связанные с нестабильностью состава шихты, приводят к появлению отливок, содержащих после отжига отбеленные участки или повышенное содержание перлита в структуре. Это вызывает повышение твердости отливки или неравномерное ее распределение, приводит к ломке обрабатываемого инструмента, нарушениям размеров нарезанной резьбы. Непосредственное измерение общепризнанной характеристики полноты отжига КЧ (твердости по Бринеллю) невозможно на тонкостенных отливках, непроизводительно и не всегда достоверно характеризует их обрабатываемость. Необходим контроль соответствия структуры отливок структуре КЧ до поступления их на механическую обработку. Кроме того, должна быть решена и задача недопущения на сборку отливок со структурой серого чугуна (СЧ), которая может возникнуть в отливках из БЧ при низкой скорости их охлаждения.

Магнитные свойства чугунов со структурами белого, серого и ковкого чугунов

Тип чугуна	Тип металлической основы	H_C , кА/м	M_S , кА/м	M_R , кА/м
Белый		1,04 – 1,28	1035	400 – 440
Серый	Ферритная	0,2 – 0,4	1433	240 – 440
	Перлитная	0,56 – 1,06	1393	320 – 560
Ковкий	Ферритная	0,12 – 0,2	1433	440 – 560
	Перлитная	0,4 – 0,88	1393	480 – 600

При отжиге такой отливки КЧ не образуется – чугун остается серым. Это приводит к снижению надежности отопительных радиаторов в эксплуатации. Гарантию соответствия структуры отливки заданной могут дать только неразрушающие методы контроля.

Цель работы – обобщение основных принципов магнитного контроля структуры чугунных отливок и технических решений, позволивших решить задачу обеспечения заданной структуры отливок массового производства из КЧ.

Магнитный контроль чугунных отливок основан на различии магнитных свойств структурных составляющих чугуна [5 – 7]. Обзор литературных данных показывает, что определяющее влияние на магнитные свойства оказывает не содержание, а состояние углерода в чугуне. Результаты обобщения исследований диапазонов изменения коэрцитивной силы H_C , остаточной намагниченности M_R и намагниченности насыщения M_S чугунов со структурами БЧ, СЧ и КЧ при различных структурах металлической матрицы приведены в таблице.

Наибольшую H_C и наименьшую M_S имеет БЧ. Увеличение графитизации приводит к снижению H_C , особенно при распаде последних остатков цементита. Это объясняется увеличением в структуре чугуна мягкой магнитной компоненты – феррита и снижением внутренних напряжений за счет того, что графит создает меньшие структурные микронапряжения, чем цементит. Исследования влияния формы магнитных включений показали [7], что чем она компактнее, тем мягче в магнитном отношении чугун. Поэтому КЧ, имеющий хлопьевидную форму графита, имеет 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 от степени графитизации, поскольку влияние соотношения графита и цементита на этот параметр больше, чем других факторов.

Таким образом, БЧ от чугунов всех других типов может быть надежно выделен по результату измерения H_C . 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 БЧ и перлитного КЧ 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 [8].

Современные средства контроля изделий массового производства

Коэрцитиметрические приборы, основанные на использовании приставных электромагнитов [9, 10] и полюсного намагничивания [11], не обладают производительностью, позволяющей осуществлять 100%-ный контроль отливок массового производства. Такой контроль может быть реализован по результату измерения остаточной намагниченности отливок в движении [12]. Оптимальным для контроля малогабаритных чугунных отливок является прибор «Магнитный анализатор качества структуры изделий МАКСИ-П (портативный)», который используется на Минском заводе отопительного оборудования и многих чугунолитейных и машиностроительных предприятиях России (рис. 1). Успешному применению прибора способствовал ряд использованных в нем технических решений, повышающих надежность его работы и чувствительность контроля. Принцип действия прибора 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 область, где намагничивающее поле отсутствует [13]. Намагничивание осуществляется в стационарном поле двухполюсной магнитной системы напряженностью около 46 кА/м. Намагничивающее поле ортогонально направлению движения изделия и близко к однородному [14]. При своем движении намагниченное изделие индуцирует в измерительном преобразователе специальной конструкции [13] сигнал, вольт-секундная площадь полуволны которого измеряется (в мкВб) и индуцируется на двухразрядном цифровом табло прибора. Экранирование преобразователя повышает чувствитель-

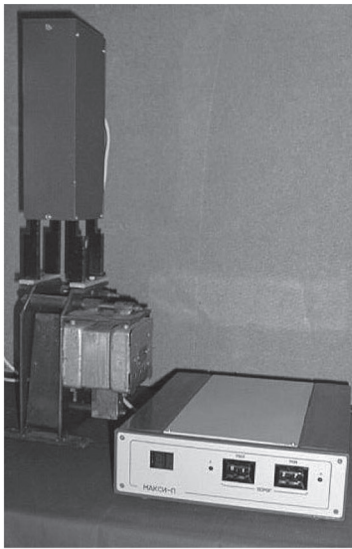
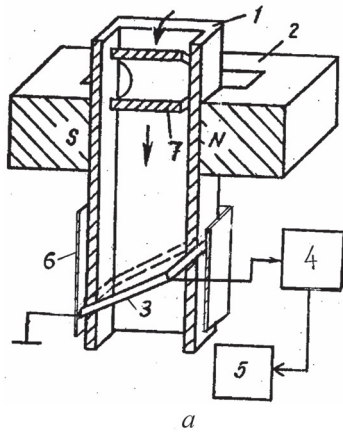


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема (а) и внешний вид (б) прибора МАКСИ-П: 1 – направляющая; 2 – двухполюсная намагничивающая система; 3 – измерительный преобразователь; 4 – измерительный канал; 5 – блок сортировки; 6 – экран; 7 – сортируемое изделие

ность контроля, помехозащищенность и уровень сигнала [15]. 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 изд/с.

Методические основы магнитного контроля отливок массового производства из КЧ по остаточной намагниченности

Разработанная методика [16–18] позволяет рассчитать остаточную намагниченность M_d изделия после намагничивания в разомкнутой магнитной цепи полем напряженностью H_e по H_C , M_S и M_R материала и размагничивающему фактору N изделия [19]. Причем в [20] теоретически показано и экспериментально подтверждено, что в полях, не доводящих отливки с большим N до технического насыщения, наблюдается более высокая (на 20–

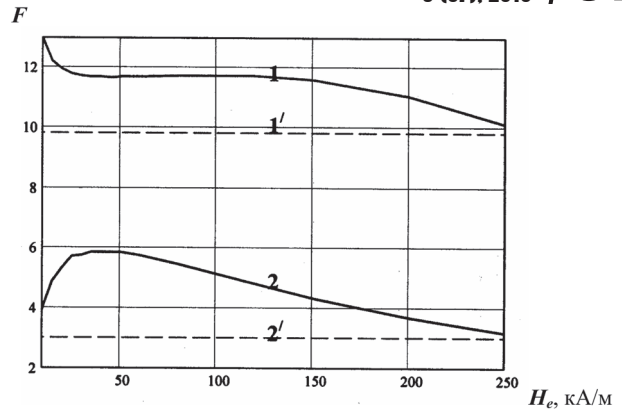


Рис. 2. Результаты [15] расчета зависимости отношения F остаточной намагниченности M_d отливок «ниппель 1¼» из БЧ к M_d тех же отливок из ферритных КЧ (1) и СЧ (2) (магнитные параметры – средние значения из таблицы) от напряженности H_e намагничивающего поля: 1', 2' – F после намагничивания отливок в поле $H_e = 1000$ кА/м

30%) чувствительность M_d отливок к структуре их материала, чем при намагничивании до насыщения (рис. 2). В [21] решена задача определения количественного соотношения содержания перлита и феррита в КЧ на основе измерения остаточного магнитного потока Φ_d в отливках с большим N (рис. 3), а в [22] разработана методика корректировки браковочных пределов при контроле отливок ниппелей из КЧ. Методика устанавливает порядок и обосновывает правомерность корректировки браковочных пределов при изменении размеров отливок.

Результатом обобщения полученных методик и технических решений явилось внедрение в производство и успешная многолетняя эксплуатация на ОАО «МЗОО» автоматизированной линии контроля и автоматической разбраковки по обрабатываемости необточенных отливок ниппелей из КЧ 30-6 на базе приборов МАКСИ-П. Эксплуатация

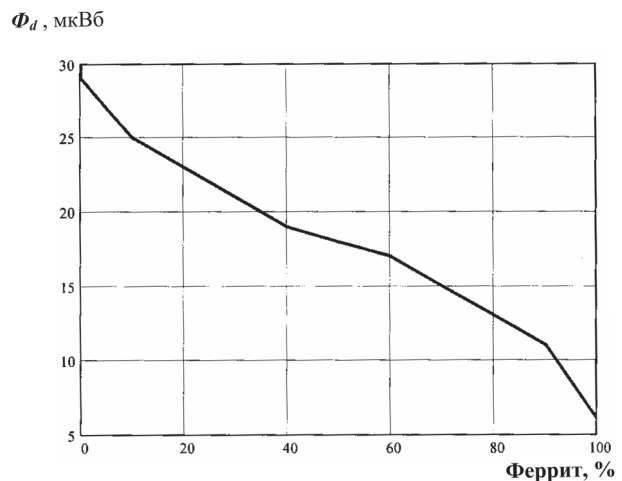


Рис. 3. Зависимость остаточного магнитного потока Φ_d в отожженной отливке «ниппель 1¼» из КЧ после намагничивания в поле 46 кА/м от содержания феррита в металлической матрице отливки



Рис. 4. Партия отливок «ниппель1¼», содержащая повышенное содержание отливок со структурой СЧ

линии с 2002 г. в цехе ковкого и серого чугуна ОАО «МЗОО» повысила рентабельность производства ниппелей, позволила обеспечить потребность завода и экспортные поставки. Кроме предотвращения попадания на операции механической обработки отливок повышенной твердости, это позволило отправлять отбракованные по структуре отливки не на переплавку, а на дополнительный отжиг, что дополнительно экономит энергетические и материальные ресурсы. Экономический эффект, полученный в 2007–2009 гг. от внедрения на МЗОО автоматизированной линии контроля и автоматической разбраковки по обрабатываемости необточенных отливок ниппелей из ковкого чугуна КЧ 30-6 на базе приборов МАКСИ-П и методики корректировки ее браковочных пределов, превысил 3 млрд. руб.

Но Φ_d в отливке, содержащей области со структурой СЧ, может соответствовать остаточному потоку в отливке со структурой КЧ с частично перлитной структурой металлической матрицы. Проведенные исследования [23] показали, что по этой причине действующая методика контроля не исключает попадание на сборку радиаторов отливок ниппелей со структурой СЧ. Задача повышения достоверности сортировки отливок из КЧ по структуре путем обеспечения отсортировки отливок со структурой ферритного СЧ от отливок из КЧ с феррито-перлитной структурой решена в разработанном способе [24], в котором каждую отливку бесконтактно намагничивают в открытой магнитной цепи при свободном падении сквозь область действия намагничивающего поля постоянной напряженности, преобразуют в электрический сигнал изменение индукции, вызванное движением отливки за пределами области действия поля, выделяют из преобразованного сигнала им-

пульс одной полярности, интегрируют его, сравнивают результаты интегрирования для каждой отливки с заранее заданным первым пороговым значением, затем отсортировывают от отливок из СЧ отливки из БЧ, для которых результат интегрирования превышает первое пороговое значение, и отправляют их на отжиг, а после отжига намагничивают каждую отливку аналогично предыдущему разу, преобразуют в электрический сигнал изменение индукции, вызванное движением отливки за пределами области действия поля, выделяют из преобразованного сигнала импульс одной полярности, интегрируют его, сравнивают результаты интегрирования для каждой отливки с заранее заданным вторым пороговым значением, и те отливки, для которых результат интегрирования оказывается меньше второго порогового значения, отсортировывают как отливки из КЧ.

Производственные испытания способа проведены в цехе серого и ковкого чугуна ОАО «МЗОО». Объектом сортировки являлась партия отливок изделий «ниппель1¼», содержащая повышенное содержание отливок со структурой СЧ (рис. 4). В качестве контрольно-измерительной аппаратуры использован прибор МАКСИ-П, модернизированный в соответствии с [15]. По результатам измерения Φ_d в отливках прибором МАКСИ-П были отобраны отливки с $\Phi_d = 28 - 46$ мкВб. Отобранные отливки были разрушены под прессом. Фотографии изломов разрушенных отливок приведены на рис. 5

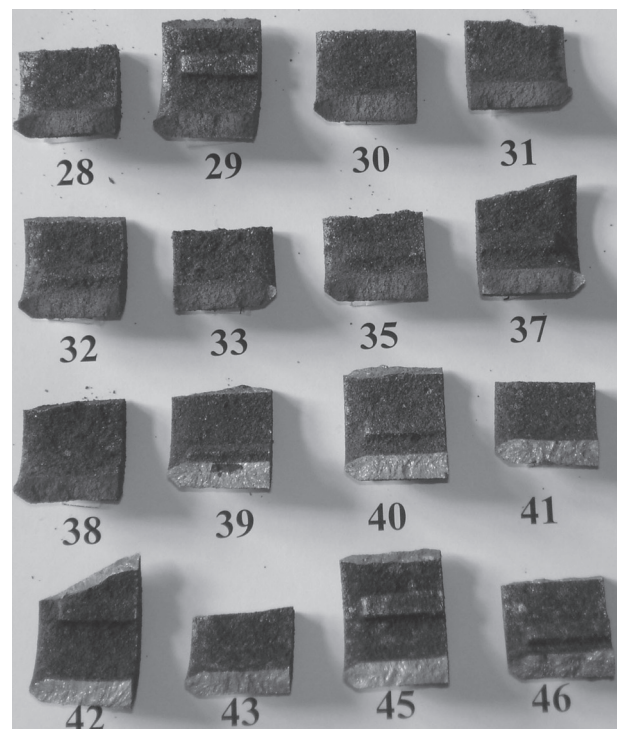


Рис. 5. Фотографии изломов разрушенных отливок «ниппель1¼» (цифры соответствуют показаниям Φ_d прибора МАКСИ-П)

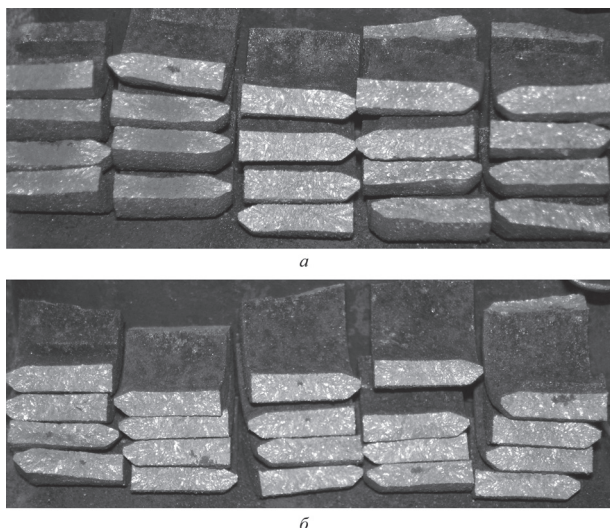


Рис. 6. Фотографии изломов разрушенных отливок «ниппель1/4» с $\Phi_d \geq 40$ мкВб (а) и $\Phi_d \geq 42$ мкВб (б)

(цифры соответствуют показаниям прибора МАКСИ-П). Для уточнения порога разбраковки отливок были отобраны отливки с $\Phi_d \geq 40$ и $\Phi_d \geq$

40 и 42 мкВб. По 20 отливок каждой группы были разрушены (рис. 6).

Анализ изломов отливок показал, что среди отливок с $\Phi_d \geq 40$ мкВб имеется около 35% отливок, в центральной части которых преобладает структура СЧ (рис. 6, а). Среди отливок с $\Phi_d \geq 42$ мкВб отсутствуют и отливки с недопустимым содержанием СЧ (рис. 6, б). На основании проведенных исследований был установлен порог «42» показаний прибора МАКСИ-П. Отливки, отсортированные при этом пороге, после отжига имели структуру КЧ, прошли сортировку на приборе МАКСИ-П, успешно обработаны и направлены в эксплуатацию.

Выводы. Результатом обобщения разработанных методик и технических решений явилось внедрение в производство и успешная многолетняя эксплуатация на ОАО «МЗОО» автоматизированной линии контроля и автоматической разбраковки по обрабатываемости необточенных отливок ниппелей из КЧ 30-6 на базе приборов МАКСИ-П, возможность обеспечения заданной структуры ниппелей, попадающих в эксплуатацию.

Литература

1. Бунин К. П., Таран Ю. Н. Строение чугуна. М.: Металлургия, 1972.
2. Щербетинский Г. В. Чугун как перспективный материал 21 столетия // Материаловедение и термическая обработка металлов. 2005. № 7. С. 83–93.
3. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. М., 1974. Т. 1, 2.
4. ГОСТ 3443-87. Методы определения структуры. М.: Изд-во стандартов, 1990.
5. Карамара А. Основные положения магнитных методов контроля состояния и качества чугунных отливок // 25-й Междунар. конгресс литейщиков. М., 1961. С. 454–475.
6. Русин П. И., Гофман Л. А., Капустянский М. А. Магнитная структуроскопия термически обработанного чугуна. Ростов-на-Дону: Ростовский университет, 1978.
7. 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.
8. Сандомирский С. Г. Возможности и ограничения магнитного контроля структуры чугунных отливок (обзор) // Литье и металлургия. 2006. № 2(38). Ч. 1. С. 118–123.
9. Горкунов Э. С., Захаров В. А. Коэрцитиметры с приставными магнитными устройствами (обзор) // Дефектоскопия. 1995. № 8. С. 69–88.
10. Мужичкий В. Ф., Безлюдько Г. Я, Ремезов В. Б. Серия портативных приборов-структуроскопов, основанных на измерении величины коэрцитивной силы // Контроль. Диагностика. 2003. № 6. С. 6–14.
11. Сандомирский С. Г. Применение полюсного намагничивания в магнитном структурном анализе (обзор) // Дефектоскопия. 2006. № 9. С. 36–64.
12. Сандомирский С. Г. Магнитный контроль физико-механических свойств изделий массового производства в движении (обзор) // Дефектоскопия. 1996. № 7. С. 24–46.
13. Сандомирский С. Г. Устройство для сортировки тел качения: А. с. СССР № 1801623; Б. И. № 10, 1993 г.
14. Сандомирский С. Г. Устройство для сортировки тел качения. Пат. РФ на полезную модель № 5781. 2009.
15. Сандомирский С. Г. Устройство для сортировки тел качения. Пат. РФ на полезную модель № 5712. 2009.
16. Сандомирский С. Г. Остаточная намагниченность ферромагнитного тела, намагниченного в открытой магнитной цепи // Дефектоскопия. 1997. № 8. С. 50–59.
17. Сандомирский С. Г. Магнитный контроль структуры стальных и чугунных изделий. Современное состояние (обзор) // Литье и металлургия. 2008. № 2. С. 33–42.
18. Сандомирский С. Г. Современные возможности магнитного контроля структуры изделий (обзор) // В мире неразрушающего контроля. 2009. № 1. С. 40–46.
19. Сандомирский С. Г. Рекомендации по применению в технических расчетах формул для центрального коэффициента размагничивания сплошных и полых цилиндров, стержней и пластин из материала с высокой магнитной проницаемостью (обзор) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2008. № 3. С. 38–46.
20. Сандомирский С. Г. Оптимизация режимов магнитного контроля структуры отливок из ковкого чугуна // Завод. лаб. Диагностика материалов. 2009. № 8. С. 39–43.

21. С ан д о м и р с к и й С. Г., П и с а р е н к о Л. З., Л у к а ш е в и ч 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.
22. С ан д о м и р с к и й С. Г., В е р ш и н и н В. А. Корректировка браковочных пределов автоматической линии разбраковки по обрабатываемости не обточенных отливок ниппелей из ковкого чугуна КЧ 30–6 при изменении их размеров // Литье и металлургия. 2008. № 1. С. 116–120.
23. С ан д о м и р с к и й С. Г. Результаты магнитного контроля структуры отливок из белого чугуна перед отжигом на ковкий // Литье и металлургия. 2009. № 3 (52). С. 109–113.
24. С ан д о м и р с к и й С. Г. Способ сортировки отливок из ковкого чугуна. Пат. РБ на изобретение № 12438. 2009.