



УДК 620.179.14
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-55-64

Поступила 25.10.2018
Received 25.10.2018

СОРТИРОВКА ОТЛИВОК НИППЕЛЕЙ ИЗ КОВКОГО ЧУГУНА ПО РЕЗУЛЬТАТУ ИЗМЕРЕНИЯ ИХ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ

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

Обобщены физические основы магнитного контроля структуры малогабаритных отливок из ковкого чугуна. Сообщается о технических особенностях и режиме работы автоматизированного прибора, используемого для контроля. Установлены особенности формирования остаточной намагниченности необточенных отливок ниппелей из ковкого чугуна с отбеленным поверхностным слоем, особенности влияния изменений толщины слоя на результат намагничивания отливок. Разработан критерий сортировки отливок с заданной толщиной отбеленного слоя по результату измерения ее остаточной намагниченности. Даны рекомендации по его использованию для корректировки браковочного предела при автоматизированной магнитной сортировке отливок по структуре на ОАО «Минский завод отопительного оборудования».

Ключевые слова. Чугунные отливки, магнитный структурный анализ, неразрушающий контроль, намагничивание.
Для цитирования. Сандомирский, С. Г. Сортировка отливок ниппелей из ковкого чугуна по результату измерения их остаточной намагниченности / С. Г. Сандомирский // *Литье и металлургия*. 2018. № 4. С. 55–64. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-55-64.

SORTING NIPPLE CASTINGS FROM MALLEABLE CAST IRON FROM THE RESULT OF MEASURING THEIR RESIDUAL MAGNETIZATION

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

The physical principles of magnetic control of the structure of malleable cast iron compact castings are summarized. It reports on the technical features and mode of operation of the automated instrument used for control. The features of formation of remanent magnetization of unhealed castings of nipples from malleable cast iron with bleached surface layer, features of the influence of changes in the layer thickness on the result of magnetization of the castings are established. A criterion for sorting castings with thickness of the bleached layer was developed based on the result of measuring its residual magnetization a given. Recommendations on its use when adjusting the rejection limit for automated magnetic sorting of castings by structure at the Minsk plant of heating equipment are given.

Keywords. Iron castings, magnetic structural analysis, nondestructive testing, magnetization.
For citation. Sandomirski S. G. Sorting nipple castings from malleable cast iron from the result of measuring their residual magnetization. *Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 4, pp. 55–64. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-55-64.

Чугун является широко используемым литейным материалом [1]. Требуемую структуру отливок создают заданием их химического и фазового составов, термической обработкой [2]. Нарушения процессов производства недопустимо изменяют структуру и свойства отливок. Определение структуры и механических свойств [3, 4] не производительно, требует разрушения отливки для подготовки микрошлифов или стандартных образцов и исключает ее дальнейшую эксплуатацию. Разнообразие структур чугуна и условий их формирования [2] определяет разнообразие физических методов неразрушающего контроля структуры чугунных отливок.

Так, на ОАО «Минский завод отопительного оборудования» и ряде металлургических заводов России производят отопительные радиаторы (рис. 1, а), предназначенные для установки в жилых и производственных помещениях. Важной деталью радиатора, соединяющей его секции между собой, является «ниппель 1¼», отливка которого представляла собой полый цилиндр длиной 30 мм, наружным диаметром 43 мм и толщиной стенки 6 мм (рис. 1, б).

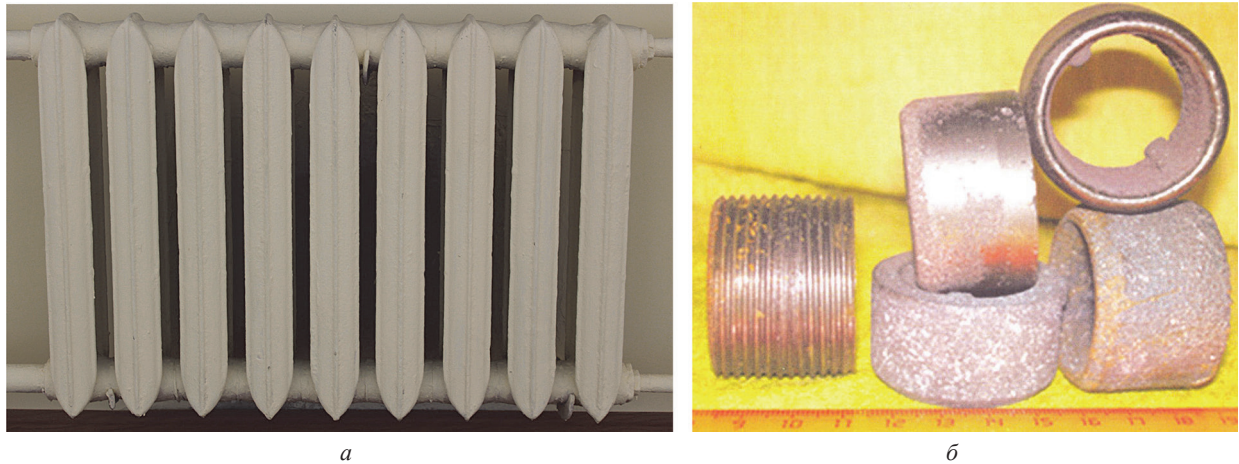


Рис. 1. Внешний вид отопительных радиаторов (а), отливок и готового изделия «ниппель 1/4\"/>

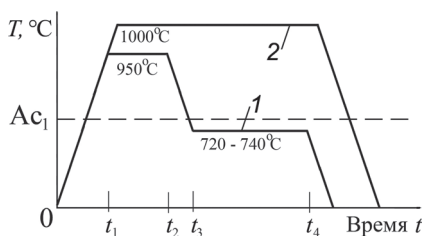


Рис. 2. Временная диаграмма отжига белого чугуна (БЧ) на ферритный (1) и перлитный (2) ковкие чугуны (КЧ). A_{c1} – температура превращения перлита в аустенит при нагревании

На наружной поверхности отливки после обточки на станках-автоматах нарезают левую и правую резьбы (рис. 1, б). Для изготовления секции радиатора (рис. 1, а), содержащей n ребер, необходимо $2(n - 1)$ ниппелей. Требования к прочности и обрабатываемости детали делают необходимым изготовление ее из ферритного ковкого чугуна (КЧ), процесс получения которого включает отжиг отливок из белого чугуна (БЧ) по специальному режиму (рис. 2, кривая 1).

Толщина стенок отливки, предназначенной для отжига, не должна превышать 40–50 мм (у отливок с толщиной стенок более 50 мм при отжиге образуется пластинчатый графит, в большей степени, чем хлопьевидный, снижающий временное сопротивление металла отливки). В зависимости от структуры металлической основы различают ферритный КЧ и перлитный КЧ. При отжиге цементит БЧ распадается с образованием графита хлопьевидной формы (рис. 3).

Ферритные КЧ получают из БЧ, содержащих 2,4–2,8% С; 0,8–1,4% Si; 0,3–0,4% Mn; 0,08–0,1% S, P ≤ 0,2%. Для защиты от окисления при отжиге отливки из БЧ укладывают в металлические ящики и засыпают песком. Отжиг БЧ состоит в медленном нагреве (интервал времени на рис. 2 от 0 до t_1 – 20–25 ч) до температуры 950–1000 °С и длительной выдержке (интервал времени на рис. 2 от t_1 до t_2 – 10–15 ч) при этой температуре. К концу выдержки заканчивается первая стадия графитизации (распад эвтектического и избыточного вторичного цементита, который в небольшом количестве имеется при этой температуре) и чугун состоит из аустенита и включений углерода отжига. Затем температуру снижают до 720–740 °С (интервал времени на рис. 2 от t_2 до t_3) и снова выдерживают чугун в течение 25–30 ч (см. рис. 2, режим

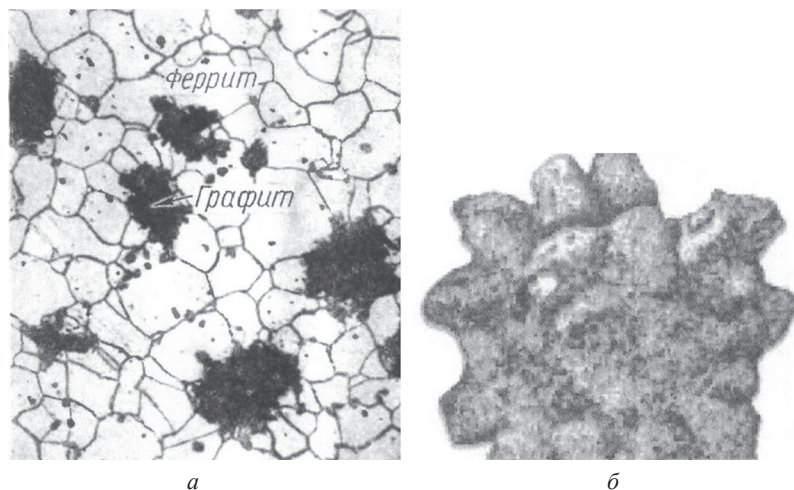


Рис. 3. Структура (а, $\times 125$) ковкого чугуна после отжига по [5] и форма (б) образовавшихся хлопьевидных графитовых включений

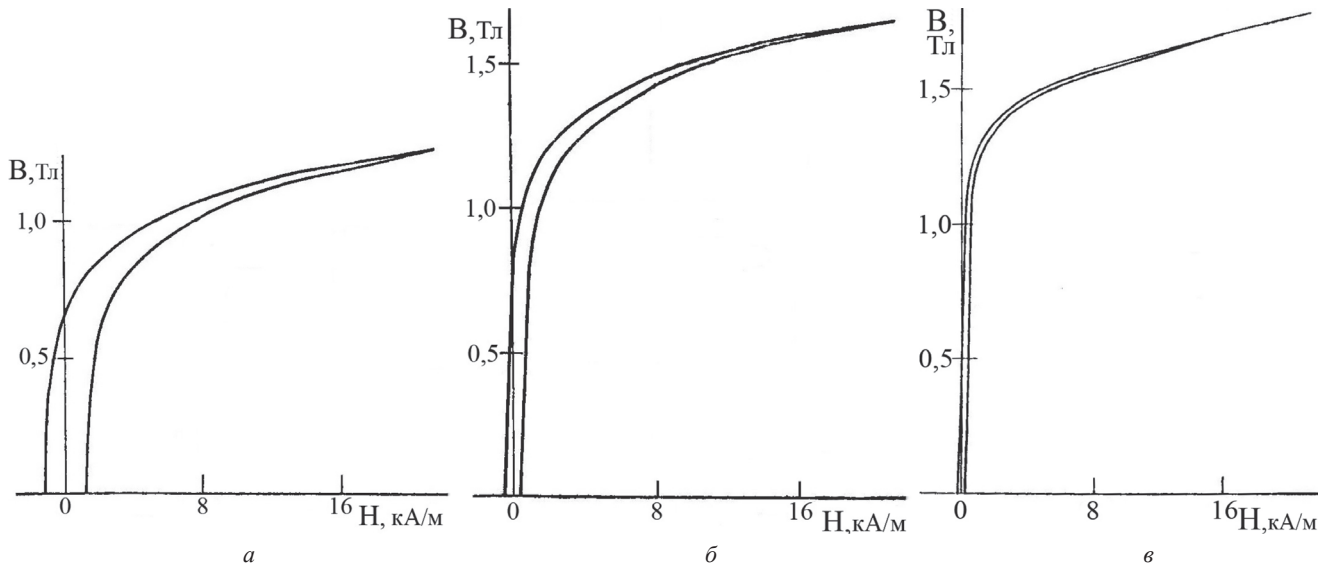


Рис. 4. Петли гистерезиса белого (а), европейского (б) и американского (в) ковких чугунов по [8]

I , интервал времени от t_3 до t_4). В это время происходит вторая стадия графитизации (распадается цементит перлита). Ферритный КЧ называют черносердечным по виду излома, который из-за большого количества графитных включений в ферритной основе имеет темный матовый цвет.

БЧ, предназначенный для получения перлитных КЧ, должен иметь следующий состав: 2,8–3,4% С; 0,5–0,8% Si; 0,4–0,5% Mn; $P \leq 0,2\%$ и $S \leq 0,12\%$. Для уменьшения содержания углерода отжиг выполняют в окислительной среде. Для этого отливки засыпают окалиной или измельченной железной рудой. Режим отжига состоит в нагреве до температуры около 1000 °С, длительной выдержке при этой температуре (первая стадия графитизации) и непрерывном медленном охлаждении до комнатной температуры (см. рис. 2, режим 2). При таком отжиге значительная часть углерода выгорает, а в поверхностном слое глубиной 1,5–2,0 мм наблюдается полное обезуглероживание. Поэтому в изломе чугун получается светлым и его называют светлосердечным.

В зависимости от временного сопротивления при растяжении (σ_B) и относительного удлинения (δ) ковкий чугун (ГОСТ 1215-79) разделяют на следующие марки (в скобках указаны значения твердости НВ): КЧ30-6 (163), КЧ33-8 (163), КЧ35-10 (163), КЧ37-12 (163) – ферритные черносердечные и КЧ45-6 (241), КЧ50-4 (241), КЧ56-4 (269), КЧ60-3 (269), КЧ63-2 (269) – перлитные светлосердечные. Из КЧ изготавливают детали высокой прочности, способные воспринимать повторно-переменные и ударные нагрузки. Широкое распространение КЧ, занимающего по механическим свойствам промежуточное положение между серым чугуном и сталью, обусловлено лучшими по сравнению со сталью литейными свойствами исходного БЧ. Это позволяет получать отливки сложной формы.

КЧ имеет высокие антикоррозионные свойства и хорошо работает в среде влажного воздуха и воды. Не высокая твердость отливок из ферритных КЧ важна для соблюдения геометрических параметров правой и левой резьбы при механической обработке заготовок на станках-автоматах. Этим обусловлена важность наличия структуры ферритного КЧ в отливках ниппелей отопительных радиаторов.

Нарушения химического состава отливок, связанные с нестабильностью состава шихты, и неоднородное распределение температуры в емкостях для отжига отливок приводят к появлению отливок, содержащих после отжига отбеленные участки или повышенное содержание перлита в структуре. Это вызывает повышение твердости отливки или не равномерное ее распределение, приводит к ломке обрабатываемого инструмента, нарушениям размеров нарезанной резьбы. Непосредственное измерение общепризнанной характеристики полноты отжига КЧ – твердости НВ по Бринеллю невозможно на тонкостенных отливках, непроизводительно и не всегда достоверно характеризует обрабатываемость отливок. Необходим контроль соответствия структуры отливок структуре ферритного КЧ до поступления их на механическую обработку.

Магнитный контроль чугунных отливок основан на различии магнитных свойств структурных составляющих чугуна [6, 7]. В [8] результаты исследований предельных петель магнитного гистерезиса (в координатах: магнитная индукция B – напряженность H намагничивающего поля) «европейского»

(коэрцитивная сила $H_{cs} = 439$ А/м, остаточная индукция $B_{rs} = 0,59$ Тл) и «американского» ($H_{cs} = 184$ А/м, $B_{rs} = 0,59$ Тл) КЧ сопоставлены с петлей гистерезиса БЧ ($H_{cs} = 1,077$ кА/м, $B_{rs} = 0,63$ Тл) (рис. 4).

Полученные результаты показывают, что БЧ от чугунов других типов может быть надежно выделен по результату измерения H_{cs} . Результаты измерения разными авторами основных магнитных параметров БЧ и КЧ приведены в таблице.

Магнитные свойства (коэрцитивная сила H_{cs} , остаточная намагниченность M_{rs} и намагниченность M_s технического насыщения) белого и ковкого чугунов по [6]

Тип чугуна	Металлическая основа	Магнитные параметры, кА/м		
		H_{cs}	M_s	M_{rs}
Белый чугун (БЧ)		1,04–1,28	1035	400–440
Ковкий чугун (КЧ)	Ферритная	0,12–0,2	1433	440–560
	Перлитная	0,4–0,88	1393	480–600

Так, H_{cs} БЧ и ферритных КЧ отличаются в 3–10 раз, что практически исключает их перепутывание при контроле. Различие H_{cs} БЧ и перлитных КЧ (в 1,2–3,0 раза) также достаточно для их сортировки. Применение магнитного контроля качества отжига отливок из БЧ на КЧ – одно из наиболее надежных использований неразрушающего контроля [7].

На ОАО «МЗОО» решена задача 100%-ного контроля структуры всех отливок ниппеля после отжига перед обточкой. Учитывая разницу в H_{cs} БЧ и КЧ, задача контроля решена магнитным методом. Необходимость обеспечения структуры ферритного КЧ у каждой из 50 тыс. выпускаемых в сутки отливок обусловила создание автоматизированной линии контроля необточенных отливок ниппелей на базе наиболее совершенного прибора контроля изделий в движении – «Магнитного анализатора качества структуры изделий МАКСИ-П (портативного)» [9, 10] (рис. 5).

Принцип действия прибора заключается [9, 10] 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 экранировано. Остаточный магнитный поток Φ_d в отливке с большим размагничивающим фактором N практически пропорционален ее коэрцитивной силе H_{cs} [11].

Изделие *б* намагничивается при движении вдоль направляющей *1* в стационарном поле двухполюсной магнитной системы *2* (рис. 5, *а*). Поэтому прибор отличается малогабаритными размерами и массой, удобством включения в технологические циклы производства, повышенной надежностью от заклинивания изделий в преобразователе. При движении намагниченное изделие индуцирует в измерительном преобразователе *3* специальной конструкции сигнал, вольт-секундная площадь полуволны которого измеряется (в мкВб) и индицируется на двухразрядном цифровом табло прибора (рис. 5, *б*). Результат измерения сравнивается с предварительно установленными пределами годности изделия по измеряемому параметру Φ_d . По результату сравнения исполнительный механизм *5* осуществляет сортировку изделий на годные и брак с производительностью до 2 изделий в секунду.

Намагничивающее поле в преобразователе прибора МАКСИ-П ортогонально направлению движения изделия (рис. 5, *а*). Причем в [12] теоретически показано (рис. 6, *а*) и экспериментально подтверждено (рис. 6, *б*), что в полях, не доводящих отливки с большим N до технического насыщения, наблюдается более высокая (на 20–30%) чувствительность остаточной намагниченности M_d отливок к структуре их материала, чем при намагничивании до насыщения (рис. 6). Напряженность H_e намагничивающего поля при сортировке отливок с большим N рекомендовано устанавливать в пределах 20–50 кА/м. Поэтому напряженность намагничивающего поля в приборе МАКСИ-П установлена около 46 кА/м [13].

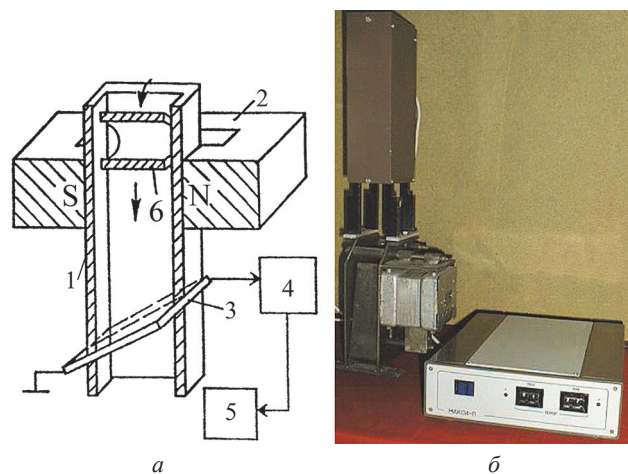


Рис. 5. Упрощенная функциональная схема (*а*) и внешний вид (*б*) прибора МАКСИ-П: *1* – направляющая; *2* – намагничивающая система с магнитными полюсами N и S; *3* – индукционная измерительная обмотка, *4* – измерительный канал; *5* – блок сортировки; *6* – сортируемое изделие

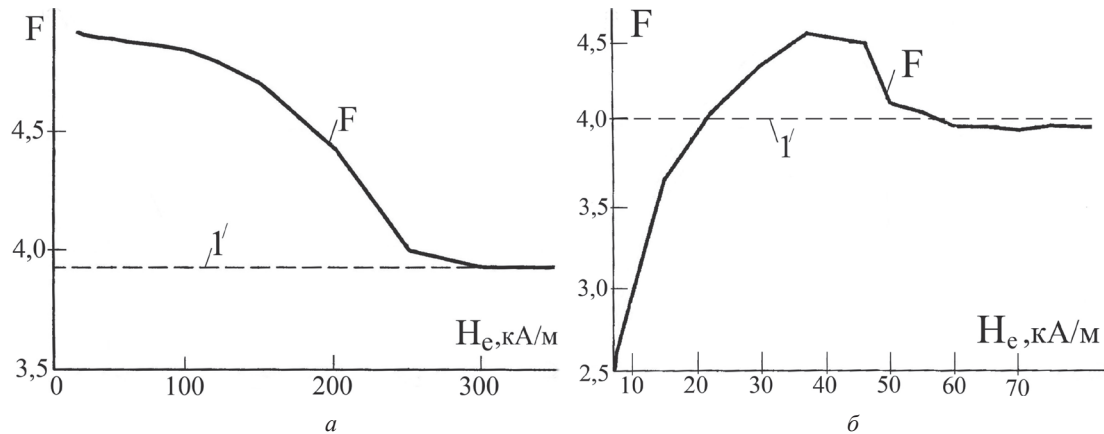


Рис. 6. Зависимость отношения F остаточной намагниченности M_d отливки «ниппель 1¼» из БЧ к остаточной намагниченности M_d этой отливки из феррито-перлитного КЧ от напряженности H_e намагничивающего поля при намагничивании отливок в разомкнутой магнитной цепи параллельно образующей. Результаты расчета (а) и эксперимента (б) в [12]: I' – F после намагничивания отливок в поле $H_e = 1000$ кА/м (а) и в пермеамetre (б)

Задача определения количественного соотношения содержания перлита и феррита в отливках «ниппель 1¼» из КЧ на основе измерения остаточного магнитного потока Φ_d в отливках прибором МАКСИ-П решена в [14]. При этом порог забраковки годных (с содержанием феррита в металлической основе отливки не менее 80%) отливок был установлен на уровне $\Phi_d = 13$ мкВб (рис. 7).

С целью экономии металла завод перешел к производству ниппелей, длина которых уменьшена на 5 мм (см. рис. 1, б). Это вызвало необходимость корректировки порога отбраковки отливок без изменения других параметров контроля. Необходимо было получить и обосновать количественные данные по корректировке браковочного предела автоматизированной линии контроля. Технические требования: при изменении браковочного предела должно быть обеспечено сохранение структурных параметров отливок, отбраковываемых прибором и пропускаемых в число годных для дальнейшей обработки. При решении поставленной задачи [15] были получены и обоснованы количественные данные по корректировке браковочного предела автоматизированной линии контроля и автоматической забраковки по структуре необточенных отливок ниппелей из КЧ30-6 на базе приборов МАКСИ-П при изменении длины отливок ниппелей с 30 до 25 мм. При расчете использована формула [11] для расчета центрального коэффициента N размагничивания полых цилиндров из материала с высокой магнитной проницаемостью. Результаты расчета изменения N отливки при уменьшении ее длины на 5 мм показали, что N увеличивается на 13%. По результатам расчета Φ_d в отливке, выполненного с учетом изменения N отливки при сохранении площади ее сечения, дана рекомендация о снижении порога отбраковки отливок с $\Phi_d = 13$ до $\Phi_d = 10$ мкВб. Разработанная методика внедрена в цехе ковкого и серого чугуна МЗОО. Обще количество отливок ниппеля, произведенных в 2007 г. и допущенных к механической обработке по результатам контроля, составило 10 567 770 шт. Из них, по данным ОТК завода, использовано для механической обработки 94,8%.

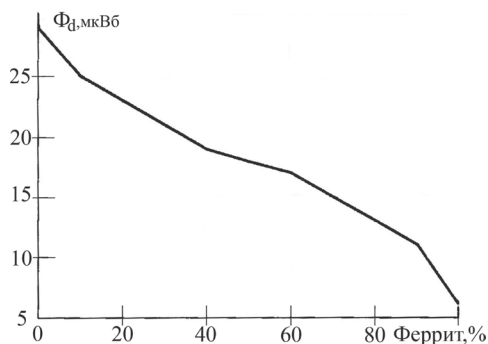


Рис. 7. Зависимость остаточного магнитного потока Φ_d в отожженной отливке «ниппель 1¼» из КЧ после намагничивания в поле 46 кА/м от содержания феррита в металлической матрице отливки



Рис. 8. Автоматизированная линия сортировки по структуре необточенных отливок ниппелей из КЧ30-6 на ОАО «МЗОО»

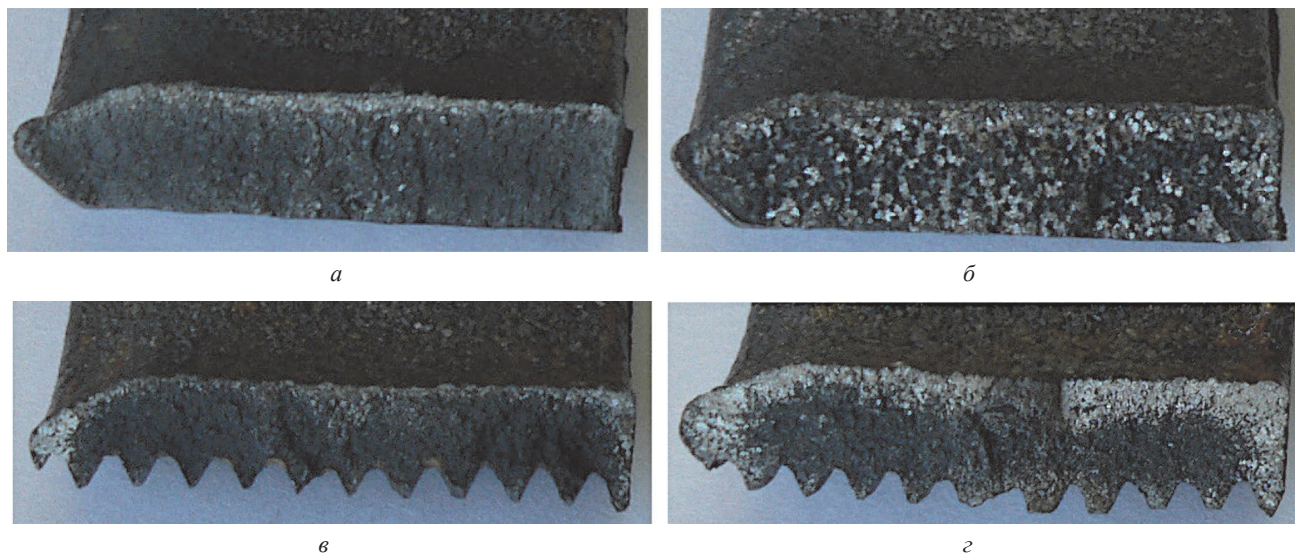


Рис. 9. Изломы nipples из ковкого чугуна КЧ30-6: а – ковкий чугун по всему объему отливки; б – вкрапления белого чугуна по всему объему отливки; в, г – отбеленный слой на поверхности отливки

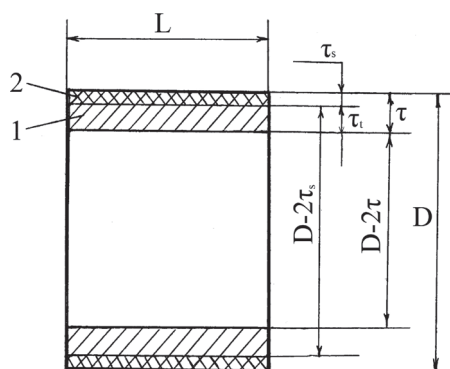


Рис. 10. Продольный разрез отливки «ниппель 1¼»: $L = 30$ мм – длина отливки; $D = 42$ мм – наружный диаметр отливки; $\tau = 6$ мм – толщина стенки отливки; 1 – «тело» отливки толщиной τ , состоящее из ферритного КЧ; 2 – отбеленный поверхностный слой отливки толщиной τ_s

Большинство из отбракованных nipples имели литейные, а не структурные дефекты. Экономический эффект от использования линии (рис. 8) в 2007 г. превысил 400 000 долларов США [15].

Но при отжиге на КЧ отливок из БЧ на поверхности отливки может сохраниться отбеленный слой (рис. 9).

Такие отливки при магнитном контроле их структуры бракуют [14, 15]. Но если толщина отбеленного слоя меньше толщины слоя, удаляемого при обточке отливки (рис. 9, в), отливка с поверхностным отбеленным слоем пригодна для механической обработки. При существующем методе сортировки значительная часть годных для механической обработки отливок направляется на переплавку. Это приводит к перерасходу материальных и трудовых ресурсов.

Эксперименты по исследованию влияния толщины и магнитных свойств материала слоев на намагничивание двухслойного изделия [16] трудоемки и не позволяют определить

пороговую намагниченность для разбраковки отливок с допустимой толщиной отбеленного слоя. Поэтому для анализа влияния толщины отбеленного слоя изделия на его остаточную намагниченность провели аналитическое моделирование. Физические основы методики расчета намагничивания двухслойных чугунных отливок разработаны в [17, 18].

В качестве модели изделия рассмотрена отливка «ниппель 1¼» (рис. 10). Считали, что «тело» отливки имеет средние значения магнитных параметров ферритного КЧ (см. таблицу). Поверхностный слой отливки считали имеющим магнитные параметры БЧ (см. таблицу).

Основой расчетной модели намагничивания двухслойной отливки являются [17, 18]:

1. Результаты (см. таблицу) измерения H_{cs} , M_{rs} и M_s БЧ и КЧ.

2. Аппроксимация [19] изменения намагниченности M материала в поле H на нисходящей ветви предельной петли магнитного гистерезиса:

$$M = \frac{2}{\pi} M_s \arctg\left[(H - H_{cs}) \frac{1}{H_{cs}} \operatorname{tg}(\pi M_{rs} / 2M_s)\right].$$

3. Формула [11] для центрального коэффициента размагничивания полого цилиндра (для расчета размагничивающих факторов N_1 и N_2 сердцевины и поверхностного слоя nipples):

$$N \approx h(2 - h)N_{\Theta}(\lambda)k(\lambda),$$

где $N_{\Theta}(\lambda) = \frac{1}{1 - \lambda^2} \left[1 - \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \lambda^2}} \arccos \lambda \right]$ (для $0 \leq \lambda < 1$); $k(\lambda) = \frac{1 + 2,35 \ln(1 + 0,137\lambda)}{1 + 2,28 \ln(1 + 0,284\lambda)}$; $h = 2\tau_s/D$ или

$h = 2\tau_s/D$ – относительная толщина стенки полого цилиндра; λ – отношение длины L полого цилиндра к его наружному диаметру D или $D - \tau_s$ (рис. 10).

Программа для расчета остаточной намагниченности двухслойного тела учитывает взаимное влияние поверхностного слоя и сердцевин (соответственно размагничивающие факторы N_{12} и N_{21}) на формирование их остаточной намагниченности и имеет структуру:

1. Ввести: Магнитные свойства H_{cs1} , M_{rs1} и M_{s1} сердцевин и H_{cs2} , M_{rs2} и M_{s2} поверхностного слоя, центральные коэффициенты размагничивания N_1 и N_2 сердцевин и поверхностного слоя ниппеля.

2. Предварительный расчет. Вычислить: $T_1 = \text{tg}(\pi M_{rs1}/2M_{s1})$ и $T_2 = \text{tg}(\pi M_{rs2}/2M_{s2})$.

3. Цикл. Решить систему уравнений:

$$M_{d1} = \frac{2M_{s1}}{\pi} \arctg \left[T_1 \left(1 + \frac{H_1}{H_{cs1}} \right) \right], \quad M_{d2} = \frac{2M_{s2}}{\pi} \arctg \left[T_2 \left(1 + \frac{H_2}{H_{cs2}} \right) \right],$$

$$H_1 = -N_1 M_{d1} - N_{21} M_{d2}, \quad H_2 = -N_2 M_{d2} - N_{12} M_{d1}.$$

4. Вывести на экран результаты вычисления остаточных намагниченностей M_{d1} и M_{d2} сердцевин и поверхностного слоя.

Для вычисления размагничивающих факторов N_{12} и N_{21} , учитывающих влияние поверхностного слоя и сердцевин друг на друга, магнитные свойства H_{cs1} , M_{rs1} , M_{s1} и H_{cs2} , M_{rs2} , M_{s2} сердцевин и поверхностного слоя задавали одинаковыми и равными магнитным свойствам ферритного КЧ (см. таблицу). После этого, выполняя процедуры программы и варьируя значения N_{12} и N_{21} , добивались одинаковых значений остаточных намагниченностей M_{d1} и M_{d2} сердцевин и поверхностного слоя.

На рис. 11 показано влияние толщины слоя двухслойного изделия «ниппель 1¼» (см. рис. 10) на центральные коэффициенты размагничивания сердцевин (N_1), поверхностного слоя (N_2) изделия и условные коэффициенты размагничивания N_{12} и N_{21} .

После определения условных коэффициентов размагничивания N_{12} и N_{21} для каждой толщины τ_s поверхностного слоя в качестве магнитных параметров слоя вводили магнитные параметры БЧ (см. таблицу), в качестве магнитных параметров сердцевин – средние значения магнитных параметров ферритного КЧ и проводили расчет остаточных намагниченностей M_{d1} и M_{d2} сердцевин и поверхностного слоя изделия по описанному выше алгоритму программы.

Результаты расчета влияния толщины отбеленного поверхностного слоя у изделия «ниппель 1¼» на намагниченности сердцевин и слоя и на среднюю намагниченность изделия в его центральном сечении [18, 20] приведены на рис. 12.

Расчеты показали, что после достижения отбеленным слоем определенной (достаточно малой) величины поле от его остаточной намагниченности перемагничивает магнитомягкую сердцевину в противоположную полярность. Поле сердцевин становится для поверхностного слоя не размагничивающим, а подмагничивающим. В результате слой и сердцевина оказываются намагниченными в противоположных направлениях до достаточно больших величин (рис. 12, а). Результаты расчета качественно подтверждены экспериментальными исследованиями модельных образцов двухслойных изделий [21].

Отметим важную особенность (рис. 13): при малых толщинах τ_s слоя происходит anomальное увеличение средней остаточной намагниченности M_d изделия. Так, при толщине отбеленного слоя в 1% от толщины стенки ниппеля его остаточная намагниченность возрастает бо-

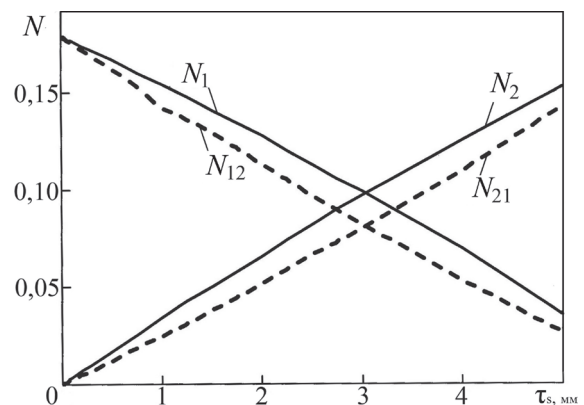


Рис. 11. Влияние толщины τ_s слоя двухслойного изделия на центральные коэффициенты размагничивания сердцевин (N_1), поверхностного слоя (N_2) и условные коэффициенты размагничивания N_{12} и N_{21}

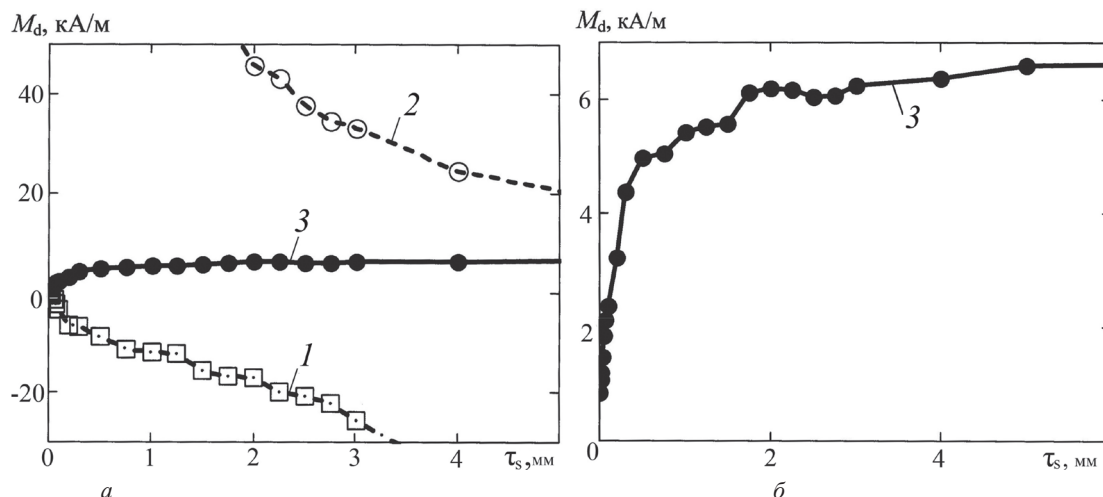


Рис. 12. Зависимость намагниченности M_d разных областей двухслойного чугунового ниппеля в остаточном намагниченном состоянии после намагничивания до технического насыщения от толщины τ_s отбеленного слоя: 1 – сердцевина ниппеля; 2 – поверхностный слой; 3 – средняя намагниченность по объему ниппеля в его центральном сечении

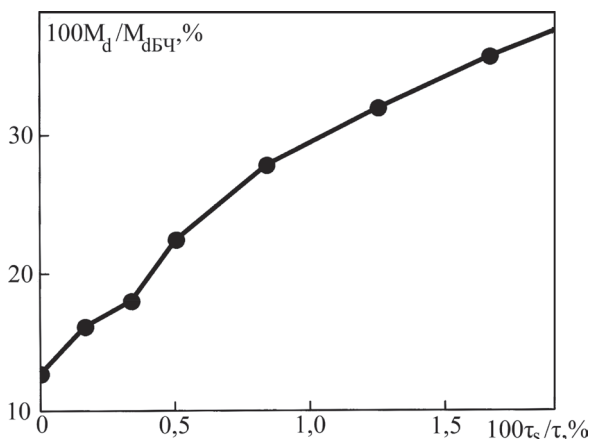


Рис. 13. Зависимость увеличения остаточной намагниченности M_d чугунового ниппеля относительно остаточной намагниченности $M_{dБЧ}$ ниппеля из БЧ от относительной толщины τ_s/τ отбеленного поверхностного слоя ниппеля

лее чем в 2 раза по сравнению с остаточной намагниченностью ниппеля из ферритного КЧ и достигает 30% от остаточной намагниченности ниппеля из БЧ. При изменении τ_s от 0 до 0,5 мм M_d ниппеля увеличивается более чем в 4 раза (рис. 12 б, 13). Дальнейшее увеличение τ_s от 0,5 до 6 мм увеличивает M_d примерно в 1,5 раза (рис. 12, б).

Этот результат использован при корректировке порога сортировки ниппелей. На основании разработанного критерия сортировки отливки с заданной толщиной отбеленного слоя по результату измерения остаточного магнитного потока дана рекомендация о допустимости повышения порога отбраковки необточенных отливок ниппелей с уровня показаний прибора МАКСИ-П $M_d = 10$ мкВб до уровня $M_d = 12$ мкВб. Реализация сделанной рекомендации повысит долю годных ниппелей без ухудшения обрабатываемости отливки после операции обточки ее поверхностного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щербединский Г. В. Чугун как перспективный материал 21 столетия / Г. В. Щербединский // Материаловедение и термическая обработка металлов. 2005. № 7. С. 83–93.
2. Бунин К. П. Строение чугуна / К. П. Бунин, Ю. Н. Таран. М.: Металлургия, 1972. 160 с.
3. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры: ГОСТ 3443-87. Введ. 01.07.88. М.: Стандартинформ, 2005. 42 с.
4. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман. М.: Машиностроение, 1972. Ч. 1. Деформация и разрушение. 472 с. Ч. 2. Механические испытания. Конструкционная прочность. 368 с.
5. Болохвитинов Н. Ф. Атлас макро- и микроструктур металлов и сплавов / Н. Ф. Болохвитинов, Е. Н. Болохвитинова // Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машгиз, 1959. 88 с.
6. 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.
7. Сандомирский С. Г. Особенности связей магнитных свойств чугунов с их структурой и магнитные методы контроля структуры чугунных отливок (обзор) / С. Г. Сандомирский // Литье и металлургия. 2016. № 4. С. 96–107.
8. Меськин В. С. Электротехнические чугуны / В. С. Меськин, Б. Е. Сомин. М.: Госэнергоиздат, 1935. 135 с.
9. Устройство для сортировки тел качения: а. с. СССР № 1801623, МКИ В07С 5/344 / С. Г. Сандомирский; Ин-т прикладной физики АН БССР. № 4926768/12; заявл. 09.04.90; опубл. 15.03.93 // Открытия. Изобретения. 1993. № 10.
10. Сандомирский С. Г. Магнитный контроль физико-механических свойств изделий массового производства в движении (Обзор) / С. Г. Сандомирский // Дефектоскопия. 1996 № 7. С. 24–46.
11. Сандомирский С. Г. Расчет и анализ размагничивающего фактора ферромагнитных тел / С. Г. Сандомирский. Минск: Белорусская наука, 2015. 244 с.

12. **Сандомирский С. Г.** Оптимизация режимов магнитного контроля структуры отливок из ковкого чугуна / С. Г. Сандомирский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. № 8. С. 39–43.
13. **Способ** магнитного контроля структуры материала с размagnичивающим фактором более 0,04; пат. 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.
14. **Сандомирский С. Г.** Количественный анализ взаимосвязи микроструктуры и магнитных свойств изделий типа «ниппель 1¼» из ковкого чугуна КЧ30-6 / С. Г. Сандомирский, Л. З. Писаренко, С. Ф. Лукашевич // Дефектоскопия. 2002. № 4. С. 18–24.
15. **Сандомирский С. Г.** Корректировка браковочных пределов автоматической линии разбраковки по обрабатываемости необточенных отливок ниппелей из ковкого чугуна КЧ30-6 при изменении их размеров / С. Г. Сандомирский, В. А. Вершинин // Литье и металлургия. 2008. № 1. С. 116–120.
16. **Особенности** распределения остаточной индукции в двухслойном ферромагнитном цилиндре / С. Г. Сандомирский [и др.] // Дефектоскопия. 1997. № 10. С. 34–41.
17. **Сандомирский С. Г.** Физические основы методики расчета намагничивания двухслойных чугунных отливок / С. Г. Сандомирский // Междунар. науч.-техн. конф. «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии». Могилев, Белорус.-Рос. ун-т. 14–15 апреля 2016 / Могилев: БРУ, 2016. С. 275–276.
18. **Сандомирский С. Г.** Корректировка критерия сортировки малогабаритных отливок из ковкого чугуна по результату измерения их остаточной намагниченности / С. Г. Сандомирский // Тр. 26-й междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2018. Беларусь»: Минск, 17–18 октября 2018 г. С. 52–56.
19. **Зацепин Н. Н.** Аналитическая функция, описывающая ход симметричной петли магнитного гистерезиса / Н. Н. Зацепин // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1973. № 4. С. 29–31.
20. **Сандомирский С. Г.** Результаты аналитического моделирования намагниченности в отливке чугунного ниппеля с отбеленным поверхностным слоем / С. Г. Сандомирский, О. В. Кузменков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Могилев, Белорус.-Рос. ун-т. 26–27 апреля 2018. Могилев: БРУ, 2018. С. 367–368.
21. **Сандомирский С. Г.** Экспериментальное исследование влияния магнитных свойств поверхностного слоя на остаточную намагниченность двухслойного изделия / С. Г. Сандомирский, Е. Г. Сандомирская // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Могилев, Белорус.-Рос. ун-т. 26–27 апреля 2018. Могилев: БРУ, 2018. С. 369–370.

REFERENCES

1. **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.
2. **Bunin K. P.** *Stroenie chuguna* [The structure of cast iron]. Moscow, Metallurgija Publ., 1972, 160 p.
3. **Otlivki** iz chuguna s razlichnoj formoj grafitu. Metody opredelenija struktury [Castings from cast iron with various forms of graphite. Methods for determining the structure]. GOST 3443–87. Moscow, Standartinform, 2005, 42 p.
4. **Fridman Ja. B.** *Mehaničeskie svoystva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. Chast' 1. *Deformacija i razrushenie* [Deformation and destruction], 472 p. Chast' 2. *Mehaničeskie ispytaniya. Konstrukcionnaja prochnost'* [Mechanical tests. Structural strength], 368 p.
5. **Bolohvitinov N. F., Bolohvitinova E. N.** *Atlas makro- i mikrostruktur metallov i splavov* [Atlas of macro- and microstructures of metals and alloys] Izdanie 2-e, pererabotannoe i dopolnennoe. Moscow, MASHGIZ Publ., 1959, 88 p.
6. **Gorkunov Je. S., Somova V. M., Nichipuruk A. P.** Magnitnye svoystva 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.
7. **Sandomirskij S. G.** Osobennosti svjazej magnitnyh svoystv chugunov s ih strukturoj i magnitnye metody kontrolja struktury chugunnyh otlivok (obzor) [Features of the relationship of the magnetic properties of cast iron with their structure and magnetic methods for monitoring the structure of iron castings (review)]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production*, 2016, no. 4, pp. 96–107.
8. **Mes'kin V. S., Somin B. E.** *Jelektrotehničeskie chuguny* [Electrotechnical cast iron]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1935, 135 p.
9. **Sandomirskij S. G.** *Ustrojstvo dlja sortirovki tel kachenija* [A device for sorting rolling elements]. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1801623, 1993.
10. **Sandomirskij S. G.** Magnitnyj kontrol' fiziko-mehaničeskikh svoystv izdelij massovogo proizvodstva v dvizhenii (obzor) [Magnetic testing of physical and mechanical properties of mass production in motion (review)]. *Defektoskopija = Russian journal of nondestructive testing*, 1996, no. 7, pp. 24–46.
11. **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.
12. **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. *Djagnostika materialov = Factory laboratory. Diagnosis materials*, 2009, no. 8, pp. 39–43.
13. **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.
14. **Sandomirskij S. G., Pisarenko L. Z., Lukashevich S. F.** Kolichestvennyj analiz vzaimosvjazi mikrostruktury i magnitnyh svoystv 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.

15. **Sandomirskij S. G., Vershinin V. A.** Korrektirovka brakovochnyh predelov avtomaticheskoy linii razbrakovki po obrabatyvaemosti ne obtochennyh otlivok nipelej iz kovkogo chuguna KCh 30–6 pri izmenenii ih razmerov [Correction of the rejection limits of the automatic screening line on the machinability of non-machined castings of ductile iron nipples KCH30-6 when changing their sizes]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production*, 2008, no. 1, pp. 116–120.

16. **Sandomirskij S. G., Delendik M. N., Sandomirskaja E. G., Gorbash V. G.** Osobnosti raspredelenija ostatocnoj 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.

17. **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 resursosberegajushhie tehnologii» [«Materials, equipment and resource-saving technologies»]. Mogilev, BRU, 2016, pp. 275–276.

18. **Sandomirskij S. G.** Korrektirovka kriterija sortirovki malogabaritnyh otlivok iz kovkogo chuguna po rezul'tatu izmerenija ih ostatocnoj namagnichennosti [Correction of the criterion for sorting small-sized ductile iron castings according to the result of measuring their residual magnetization]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2018. Belarus': trudy 26-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. Minsk, BNTU, pp. 52–56.

19. **Zacepin N. N.** Analiticheskaja funkcija, opisuvajushhaja hod simmetrichnoj petli magnitnogo gisterezisa [Analytical function describing the course of a symmetric magnetic hysteresis loop]. *Vesci AN BSSR, serija fiziko-tjechnichnyh navuk = Proceedings academy of sciences of BSSR, physical-technical series*, 1973, no. 4, pp. 29–31.

20. **Sandomirskij S. G., Kuzmenkov O. V.** Rezul'taty analiticheskogo modelirovaniya namagnichennosti v otlivke chugunnogo nippelja s otbelennym poverhnostnym sloem [The results of analytical modeling of the magnetization in the casting of iron nipples with bleached surface layer]. Materialy, oborudovanie i resursosberegajushhie tehnologii [Materials, equipment and resource-saving technologies]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. Mogilev, Belorussko-Rossijskij universitet, 2018, pp. 367–368.

21. **Sandomirskij S. G., Sandomirskaja E. G.** Jeksperimental'noe issledovanie vlijanija magnitnyh svojstv poverhnostnogo sloja na ostatocnuju namagnichennost' dvuhslojnogo izdelija [Experimental study of the influence of the magnetic properties of the surface layer on the residual magnetization of a two-layer product]. *Materialy, oborudovanie i resursosberegajushhie tehnologii* [Materials, equipment and resource-saving technologies]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. Mogilev, Belorussko-Rossijskij universitet, 2018, pp. 369–370.