

УДК 621.74.045

В. С. Дорошенко*

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

О ПОЛУЧЕНИИ АУСФЕРРИТНОГО ЧУГУНА ИЗ ЛИТОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ЛГМ-ПРОЦЕССЕ

Выполнен краткий обзор процессов получения аусферритного чугуна. Предложен способ получения отливок из аусферритного (бейнитного) чугуна с шаровидным графитом из литого состояния без применения дополнительной термообработки. Способ рекомендован для литейных предприятий, использующих ЛГМ-процесс.

Ключевые слова: аусферритный чугун, изотермическая закалка, чугун с шаровидным графитом, охлаждение отливки, песчаная форма, вакуумная формовка, литье по газифицируемым моделям.

Зроблено короткий огляд процесів отримання аусферитного чавуну. Запропоновано спосіб отримання виливків з аусферитного (бейнітного) чавуну з кулястим графітом з литого стану без застосування додаткової термообробки. Спосіб рекомендовано для ливарних підприємств, що використовують ЛГМ-процес.

Ключові слова: аусферитний чавун, ізотермічне гартування, чавун з кулястим графітом, охолодження виливка, піщана форма, вакуумне формування, лиття за моделями, що газифікуються.

Brief overview of the processes of obtaining Ductile Iron is executed. The method of obtaining castings from auxferritic (bainitic) cast iron with nodular graphite from the cast state without the use of additional heat treatment is proposed. The method is recommended for foundries using the lost foam casting process.

Keywords: auxferritic cast iron, isothermal hardening, cast iron with nodular graphite, casting cooling, sand mold, vacuum molding, lost foam casting process.

Создание процессов производства отливок из новых сплавов с улучшенными механическими свойствами и низкими издержками производства является важной областью исследования. В частности, недостаток чугунов с шаровидным графитом (ЧШГ) высоких марок в литом состоянии заключается в их низких пластичности и вязкости. Этот недостаток устраняется путем обеспечения бейнитной, бейнитно-аустенитной или аусферритной (ausferritic) структуры металлической основы (матрицы) ЧШГ. В настоящее время одним из основных способов получения таких чугунов является изотермическая закалка.

* Работа выполнена под рук. проф. Шинского О. И.

В процессе проведения исследований под руководством профессора Шинского О. И. по разработке научных и технологических основ создания литых конструкций из железоуглеродистых и цветных сплавов, оптимальных процессов их получения и автоматизированных методов проектирования, установлена очевидная перспективность разработки технологических процессов получения отливок из ЧШГ повышенной прочности. По теме производства таких чугунов в последние годы вышло много публикаций.

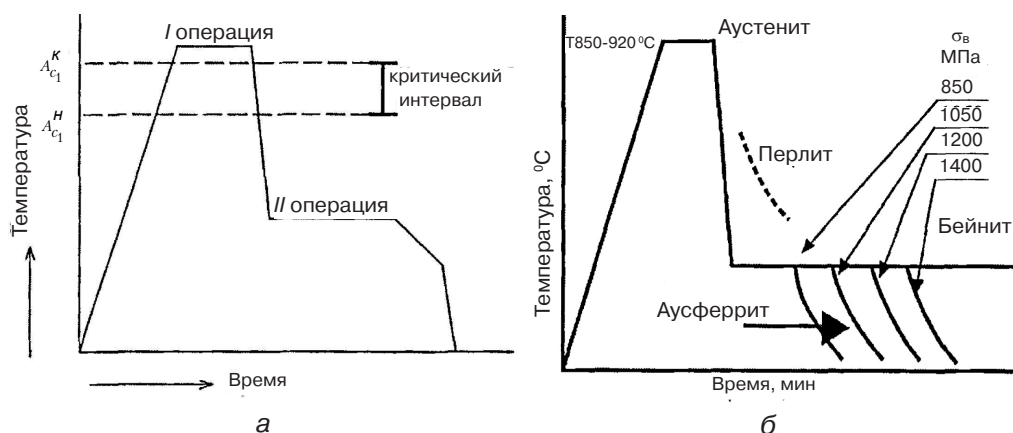
При разработке новых способов литья высокопрочных сплавов руководствовались металлосберегающей концепцией сочетания новых научно-технических достижений в следующих литейно-металлургических областях: 1 – получение высокопрочных сплавов; 2 – формовочные процессы для точных методов литья, в том числе с использованием песчаных форм, полученных по разовым моделям, а также с возможностью регулируемого охлаждения отливок в песчаных формах; 3 – термообработка заготовок для получения необходимой мелкодисперсной микроструктуры металлической матрицы и повышенных свойств литых конструкций, в частности, с применением литейной формы в качестве инструмента регулирования структурообразования и свойств металла в отливках из графитизированных чугунов; 4 – экологическая безопасность металлургических процессов с применением вакуумирования формы, безвредных модельно-формовочных материалов, хладагентов и нагреваемых технологических сред.

Изотермическая закалка чугуновых отливок предопределяет необходимость последовательного проведения двух основных операций (рисунок): первая – аустенитизация, то есть нагрев до температуры закалки и выдержка; вторая – переохлаждение аустенита с последующим его распадом в изотермических условиях [1, 2]. В изотермических условиях аустенит, переохлажденный до температур промежуточной области, распадается на феррит и цементит, но образует при этом особый вид структуры, которая называется бейнитом. Бейнитное превращение в чугунах начинается с образования игл или пластинок феррита (имея общность с кинетикой мартенситного превращения). По мере развития процесса промежуточного превращения они сливаются, заклинивая остающиеся участки аустенита. Процесс заканчивается распадом остаточного аустенита на смесь феррита и цементита.

Однако, благодаря наличию в составе чугуна кремния ($> 1,5\%$), это превращение может подобным образом завершаться только в результате больших выдержек при температурах изотерм $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше. При более низких температурах изотермической выдержки происходит стабилизация аустенита, которая проявляется в том, что после охлаждения до комнатной температуры он сохраняется в структуре чугунов. Вне зависимости от температуры изотермы в структуре чугунов всегда остается относительно большое количество аустенита (от 20 до 50 %) [3]. Хотя процесс термообработки (см. рисунок) трудоемкий, энергоемкий и требует использования специального термического оборудования, но изотермическая закалка позволяет получать бейнитный чугун из обычного ЧШГ без дополнительного легирования.

Согласно данным из обширного списка публикаций, приведенных в работе [1], режим изотермической закалки состоит из следующих двух операций: первая – аустенитизация проводится при температуре $850\text{--}920$ или до порядка $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2], и выдержка; вторая – переохлаждение аустенита с последующим его распадом в изотермических условиях при температуре $320\text{--}450$ [1] или в диапазоне $300\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2], и последующее охлаждение на воздухе (см. рисунок). Закаленный чугун с изотермическим превращением – новый литейный материал с большим будущим, характеризуется высокими прочностью и пластичностью, а также низкими издержками производства [1].

Такой ЧШГ в российской литературе обозначают аббревиатурой АБЧШГ – аустенито-бейнитный ЧШГ, англоязычное сокращение ADI – Austempering Ductile Iron, в немецкоязычной литературе употребляют термин «Zwischenstufenverg tung von Gusseisen mit Kugelgraphit», который можно перевести как «закалка ЧШГ в промежуточной области превращений» [2].



Схемы режима изотермической закалки при полной аустенитизации ЧШГ (а, б), включая ориентировочные значения σ_v в зависимости от длительности изотермической выдержки (б) [1]

Согласно работе [1], для получения ADI (разновидности бейнитного ЧШГ) нужно подвергать термообработке отливки, выполненные из «обычного» ЧШГ с перлитной основой без его легирования, выдерживая их при температуре около 920 с последующей быстрой закалкой приблизительно до 350 °С в соляной ванне. В этой ванне отливки должны выдерживаться в течение определенного времени, чтобы получить аустенит и феррит с игольчатой структурой, называемый «аусферрит» (также названный бескарбидным бейнитом [1]), который придаст чугуну ADI хорошую пластичность и высокое удлинение. Предел прочности на растяжение находится в интервале 800-1600 МПа при удлинении 1-10 %.

Чугун ADI включен в стандарты DIN EN 1563/1564 и ASTM 897M-90 (таблица)

Механические свойства чугуна ADI (США)

Тип	σ_v , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	Ударная вязкость, КСУ*	НВ
1	850	550	10	100	269-321
2	1050	700	7	80	320-363
3	1200	850	4	60	341-444
4	1400	1100	1	35	388-477
5	1600	1300	—	—	444-555

Износостойкость и высокая пластичность – важнейшие параметры ADI, его микроструктура включает 20-50 % аустенита, который при упрочнении посредством наклепа преобразуется в мартенсит на поверхности отливки. Поэтому поверхность будет твердой и износостойкой, в то же время в середине отливка останется пластичной и мягкой. Кроме того, отливка имеет высокую стойкость к хрупкому разрушению. Поверхностное упрочнение повышает также усталостную стойкость.

*испытания на ударную вязкость с надрезом при $t^0 = 22 \pm 4$ °С

Недостатком вышеописанного способа получения бейнитных ЧКГ при изотермической закалке является высокие трудоемкость и энергоемкость процесса вследствие необходимости использования специального термического оборудования и жидких охлаждающих сред в виде расплавов солей и щелочей с вредными выделениями. Однако, при использовании изотермической закалки бейнитный ЧКГ может быть получен из ЧКГ по ДСТУ 3925-99 или из низколегированного ЧКГ практически с повышением механических свойств в 2-3 раза (таблица) по сравнению с литьем ЧКГ в песчаные формы с традиционным охлаждением в песчаной смеси этих форм.

Для получения бейнитных структур из литого состояния известны рекомендации выбивать из формы горячую отливку и производить изотермическую выдержку в аустенитной области при температуре 850-1000 °С [4]. Затем быстро переносить отливку для закалки в масло с температурой, соответствующей бейнитному пре-

вращению, и выдерживать отливку при этой температуре некоторое время с целью преодоления ею перлитной области, поскольку перлит препятствует формированию аусферритной структуры. Заключительная операция – изотермическая выдержка при температуре 400 °С.

Недостатком данного способа для литья в песчаные формы из смесей со связующим является то, что он не применим для отливок, имеющих невыбитые стержни и неочищенные от формовочных смесей. Способ непригоден при массовом производстве деталей сложной формы, поскольку из-за высокой температуры при силовом воздействии на форму после выбивки детали теряют заданную геометрию, а при закалке из-за наличия невыбитых горячих смесей происходят взрывы, и отливки имеют «пятнистую» структуру.

Еще одна особенность бейнитного превращения в графитизированных чугунах – очень высокая склонность к ферритизации структуры. Эти чугуны содержат повышенное количество кремния. Например, в ЧШГ по ДСТУ 3925-99 содержание кремния составляет 2,7-3,6 %мас. Кремний является сильным ферритизатором структуры, его действие особенно проявляется в условиях распада метастабильного аустенита [1]. При этом нет времени на очистку и выбивку стержней, следуя способу [4], поскольку любая задержка до резкого охлаждения отливки ведет к нежелательному результату распада аустенита, лишая отливку заданной аусферитной или бейнитной структуры.

Тенденция к сокращению цикла получения заготовки из высокопрочного ЧШГ с различной структурой металлической матрицы в литом состоянии также отражена в способе [5], включающем, в частности, получение отливки в песчаной форме при затвердевании из расплава ЧШГ в полости песчаной формы, охлаждение затвердевшей отливки до температуры 900-1000 °С, удаление отливки из формы и быстром переносе в среду в виде жидкой ванны с температурой, определяющейся требуемой структурой металлической матрицы металла отливки. В этом способе отсутствует выдержка отливки при высоких температурах, однако его недостатки связаны с наличием жидких охлаждающих сред в виде расплавов солей и щелочей, поддерживаемых при высоких температурах и имеющих вредные выделения. Кроме того, сохраняются недостатки, указанные при критике способа [4].

Указанные в последнем способе высокие температуры весьма затрудняют захват отливки и ее перемещение, при этом возможно отламывание литников. Стремясь расширить температурные пределы, учитывали обоснование этих пределов в работе [1], в которой согласно практики литья температура аустенитизации находится в интервале 850-920 °С и оказывает существенное влияние на структуру и свойства бейнитного чугуна: при ее понижении в матрице остается феррит, что уменьшает твердость чугуна, а повышение температуры аустенитизации более 950 °С способствует растворению карбидов и также ведет к снижению твердости. Поэтому считали возможным использовать значение 850 °С как нижней температуры, при которой следует извлекать отливки из формы.

С учетом специализации института (ФТИМС НАН Украины) была поставлена задача разработки процесса литья ЧШГ в формы из сухого песка без связующего, что свойственно технологиям литья по газифицируемым моделям (ЛГМ, Lost Foam Casting), а также для литья в формы, изготовленные вакуумно-пленочной формовкой (ВПФ, V-Process) без песчаных стержней. Сыпучий песок в этих процессах упрочняется перепадом атмосферного давления воздуха и разрежения в порах песка при подключении формы к вакуумному насосу. Кроме того, для мелких и тонкостенных отливок при ЛГМ сухой песок можно упрочнять путем установки грузов на верхний контрлад опоки. Для мелкого литья в оболочковые формы при засыпке песком (опорным наполнителем) пространства между оболочковыми форм в контейнерной опоке также достигают того, что большая часть объема формы заполнена сухим песком, а форму в отдельных случаях могут вакуумировать при заливке металлом.

Сухой песок проводит тепло хуже, и время охлаждения отливок примерно на 22 %

дольше, чем в традиционных формах со связующим при охлаждении отливки до традиционных температур выбивки [6]. При этом снижение скорости охлаждения отливки в какой-то мере аналогично изотермической выдержке в аустенитной области при температуре 850-1000 °С, указанной в патенте [4], оправдывает использование нижней температуры 850 °С и не противоречит температурному интервалу, при котором отливки извлекают из формы, согласно способу [5], без учета такого замедления охлаждения отливки. При выборе конкретной температуры аустенизации учитывают, что при высокой температуре аустенизации концентрация углерода в аустените повышается, и последующий его распад затрудняется, а содержание углерода, растворенного в аустените, определяется длительностью выдержки при температуре аустенизации [1].

С целью снижения затрат на оборудование по обработке отливок и улучшение экологических условий такой обработки был предложен способ изготовления отливок с аусферритного или бейнитного ЧШГ, включающий затвердевание расплава ЧШГ в песчаной форме из сыпучего песка, изготовленной в контейнерной опоке, охлаждение затвердевшего отливки в этой форме, удаление отливки из сыпучего песка формы при температуре 850-1000 °С, закалку отливки путем быстрого охлаждения, перенос отливки в среду с температурой 300-500 °С с последующей выдержкой отливки при этой температуре, отличающийся тем, что быстрое охлаждение отливки и (или) выдержку отливки выполняют в контейнерных опоках.

Кроме того, в качестве среды с температурой 300-500 °С предусмотрено использовать предварительно нагретый сыпучий формовочный песок и (или) сыпучую песчаную смесь, нагретую теплом отливок, прошедших выбивку или выдержку, а также при необходимости эту песчаную среду дополнительно нагревают электрическими или газовыми нагревателями. Как вариант, закалку отливки и (или) выдержку отливки предложено выполнять в контейнерных опоках с нижним затвором и (или) решеткой в нижней части контейнерной опоки и (или) со средствами вакуумирования, которые при выполнении отдельных операций этого способа, подключают к вакуумному насосу или вынимают из контейнерной опоки.

Основная сфера использования способа охватывает технологический процесс получения отливок из ЧШГ с высокими прочностными показателями в условиях литейного цеха. В частности, нижеуказанные структуры металлической матрицы ЧКГ облают такими показателями механических свойств – прочности, твердости и относительного удлинения (σ_b , МПа / HB / δ , %): верхний бейнит – 850-1100 / 250-350 / 4-15; нижний бейнит – 1200-1600 / 350-550 / 1-4; аусферрит – 1000-1500 / 300-550 / 2-12 [7]. При этом процессу получения аусферритного ЧШГ присуща наиболее короткая выдержка в изотермических условиях для распада части аустенита.

В предложенном способе используют то преимущество форм из сухого песка, что он подобно жидкости быстро самопроизвольно высыпается из опок при выбивке отливок. При затвердении отливки из ЧШГ формы отключают от вакуум-насоса, и до температуры 850-1000 °С отливка охлаждается в сыпучем песке. Для процесса ЛГМ не используют песчаных стержней, а формы изготавливают в контейнерных опоках (контейнерах) со сплошным дном или с челюстным затвором в донной части. В первом варианте из песка отливку удаляют путем опрокидывания контейнера или зацепления за стояк и вытягивания из песка краном. Наиболее удобен второй вариант, при котором песок удаляют из контейнера открыванием челюстного затвора с быстрым высыпанием песка вниз, при этом отливка остается в пустом контейнере или возможно предварительное вытягивание ее из песка. Указанные операции освобождения отливки от песка, как правило, занимают 5-15 сек или их несложно довести до такой длительности, выбрав высыпание или извлечение краном отливки из формы.

Подобные контейнерные формы применяют в ряде способов ВПФ, в частности, при формовке лопастей по неразъемной модели (а. с. СРСР 1022755, Модель для изготовления литейных форм методом вакуумно-пленочной формовки, бюл. 22, 1983) в контейнере с вертикальным разъемом и аналогичными процессу ЛГМ операциями извлечения отливки. Использование возможностей быстрого извлечения отливки

из указанных форм с сухим песком при заданной температуре практически без силового воздействия, присущего песчаным формам со связующим, отсутствие стержней предотвращает опасность деформирования горячей отливки и позволяет быстро перенести ее в закалочную среду без излишнего охлаждения на воздухе, ведущего к снижающей прочность ферритизации структуры.

Такую среду создают в тех же контейнерах, что изготавливают формы, применяя свойства этих контейнеров как герметичных емкостей для вакуумируемых форм. При выборе режимов изотермической закалки учитывали опыт охлаждения путем замачивания в воде со скоростью 350-500 °C/с и различной выдержкой [1]. В отдельных случаях отливки из низколегированного ЧШГ с толщиной стенки до 20 мм допускается охлаждать на воздухе. А более массивные отливки (с толщиной стенки 25 мм и более) замачивают в воде с различной выдержкой, зависящей от толщины стенки отливки (при толщине стенки 25-40 мм – в течение 4-5 с, а при толщине более 40 мм – в течение 6-10 с) [1]. Контейнеры с челюстным затвором, разработанные ФТИМС НАН Украины [8], удобны тем, что, удалив из них песок быстрым высыпанием вниз и оставив отливку в пустом контейнере (мелкие отливки на металлической решетке), при неполном открытии затвора можно частично опускать этот контейнер в емкость с водой, замачивая в воде отливку с различной выдержкой. Также отрабатываются и другие варианты элементов оснастки для безопасного и быстрого извлечения из контейнерных форм горячих оливок различной конфигурации и крупности, а также способы их быстрого охлаждения.

Например, к деталям типа средних и крупных зубчатых колес применяют водовоздушную закалку чугунных заготовок [2]. Технология автоматизированного управляемого охлаждения в газовой или водовоздушной среде («спрейерное охлаждение» или «душирование») служит приемлемой альтернативой соляным ваннам, наиболее часто применяемым для такого вида закалки. При этом водовоздушная смесь, содержащая капли воды заданной дисперсности, создается специальными форсунками и равномерно распределяется по поверхности охлаждаемой детали. Управление скоростью охлаждения обеспечивается за счет изменения плотности орошения поверхности.

Предложенное расположение горизонтальной решетки (в варианте – съемной) под горячей отливой на расстоянии 20-50 мм от дна контейнерной опоки позволяло подать водовоздушную смесь (аэрозоль) по всей поверхности отливки, включая попадание ее сквозь решетку к поверхности нижней части отливки. С этой целью применяют форсунки, в которых вода распыляется с помощью сжатого воздуха [9] (реже безвоздушным распылением). Регулируя соотношение воды и воздуха, а также давление смеси, изменяют скорость охлаждения. Это особенно важно при закалке крупных деталей, когда охлаждение в воде может вызвать трещины, а охлаждение в масле не обеспечивает достижения необходимой скорости охлаждения. При давлении воздуха 3 ат и расходе воды 100 л/ч скорость охлаждения получается примерно такой же, как и в масле [9].

Охлаждающая способность водовоздушной смеси возрастает с увеличением воды в ней только до определенного предела, выше которого увеличение количества воды приводит к стабилизации коэффициента теплообмена α или даже к его снижению, но при спрейерном охлаждении можно получить значения коэффициента α , значительно превышающие их при охлаждении в неподвижной воде [10]. Основным преимуществом водовоздушного метода является получение в широком интервале скоростей охлаждения: от равных охлаждению в неподвижной воде до охлаждению в масле.

После достижения температуры 300-500 °C в результате закалки замачиванием или душированием в пустом контейнере с глухим дном, челюстным затвором, переносной форсункой или системой форсунок отливку помещают в другой пустой контейнер с установленным в нем трубчатым электронагревателем (ТЕН) или системой ТЭНов, размещенных внутри вдоль стенок контейнера. Отливку засыпают предварительно нагретым песком при температуре 300-500 °C подобно формовке

модели при ЛГМ. Этот песок нагревают электрическими или газовыми нагревателями, например, в камерной печи, а также возможно использование тепла отливки для частичного нагрева песка, из которого ее удалили, и (или) использование сыпучей песчаной смеси, нагретой теплом других остывающих и прошедших выбивку или подобную выдержку отливок. При этом имеется в виду песчаная смесь, состоящая (в общем случае, согласно трактовке справочниками по формовочным материалам) из отработанного, свежего и регенерированного формовочного песка и нагретая до температуры 300-500 °С. Установленными вдоль стенок контейнера ТЭНами поддерживают эту температуру на протяжении заданного времени, а затем извлекают отливку из контейнера и охлаждают на воздухе. Также поддерживать эту температуру заданное время можно помещением контейнера с отливкой в камерную печь или сушило с нагревателем любой конструкции.

По сути, изменение традиционного охлаждения отливки в песке контейнерной формы сводится к его прерыванию – изъятию отливки из песка в интервале от 850-1000 до 300-500 °С, быстрому охлаждению отливки в этом интервале, возвращению отливки в песок с заданной температурой в пределах 300-500 °С и выдержкой при этой температуре согласно известным решениям для достижения нужной структуры металла.

Контейнеры для ЛГМ и ВПФ, как правило, обладают средствами вакуумирования, которые при выполнении ряда операций рекомендовано подключать к вакуум-насосу: при контактировании отливки с водой и (или) высыпании, пересыпании горячих песка или смеси. Вакуумированием достигали уменьшения выброса пара или пыли, создавая направленный поток воздуха внутрь полости контейнера, который вакуумировали. Часто в качестве средств вакуумирования в контейнерах используют гибкие металлорукава [8] или вставные в полость контейнера вакуум-фильтры. При использовании контейнера для изотермической выдержки их можно полностью или частично удалять из полости контейнера, например, для освобождения дополнительного места и увеличения количества отливок, помещаемых в контейнер.

Время выдержки отливок в нагретой песчаной среде определяется толщиной стенки, конфигурацией отливки и требуемой структурой металлической матрицы. Оно может составлять от 30 мин до 5 ч. Меняя соотношение бейнита и аустенита в структуре чугуна, можно получать одновременно высокую прочность и пластичность.

Температура извлечения отливок из формы должна обеспечивать получение в них аустенитной структуры, что сокращает технологический процесс и не требует дополнительной изотермической выдержки при температурах выше эвтектоидного превращения. При этом шаровидная форма графита в отливках сформировалась при кристаллизации, поэтому отливка при температуре извлечения из формы имеет аустенитную структуру металлической матрицы с включениями графита шаровидной формы.

Таким образом, используя известные режимы обработки отливки, включая скорости охлаждения и температуры выдержки, методы контроля температуры и продолжительности операций, а также сочетая свойства металла, формы из сухого песка и термообработки, получали полезный эффект. Его достигали путем применения текучести сухого песка, герметичных контейнеров, замены жидких сред на песчаные среды для изотермической выдержки, в частности, нагретые сыпучие среды в виде выбиваемого формовочного песка и (или) специально нагреваемого песка. Также средства вакуумирования контейнеров рекомендовано использовать для отсоса вредных выбросов пыли или пара в воздух цеха при выполнении высыпания горячего песка из контейнера в другой контейнер и при контакте отливки с жидким хладагентом – водой.

Замена жидких нагреваемых технологических сред на сыпучие песчаные среды также упрощает разработку способов контроля режимов изотермической закалки. По аналогии с определением содержания остаточного аустенита (немагнитной фазы) в образцах из сталей путем измерения силы притяжения постоянного магнита к объекту контроля [11] разрабатывается датчик определения содержания остаточного аустенита в ЧШГ. В области магнитных измерений для неразрушающего контроля качества металлопродукции для двух образцов одинаковой массы (эта-

лонного образца и образца, подлежащего контролю) известны методы измерения силы притяжения к ним постоянных магнитов с идентичными характеристиками через одинаковые воздушные зазоры при сравнении полученных сигналов.

Аналогичный по принципу действия датчик скобой или струбциной крепят к стенке отливки, помещаемой в песчаную среду для изотермической выдержки. Датчик имеет подвижный магнит, расположенный с минимальным зазором к отливке и удерживаемый механическим или магнитным способом с определенной силой. По мере изотермической выдержки и распада аустенита в отливке нарастает магнитная фаза с увеличением силы притяжения к ней подвижного магнита. В определенный момент он движется к отливке, замыкает электроконтакт, дающий световой или звуковой сигнал о прекращении изотермической выдержки. Отливку извлекают из горячего песка и охлаждают на воздухе. Силу фиксирования магнита в датчике (например, удерживаемым упругой силой пружины с регулируемым растяжением) устанавливают, поместив датчик на отливку с известным содержанием аустенита и находящейся в тех же условиях, что и контролируемая отливка.

Современные компьютерные программы позволяют осуществлять микромоделирование и прогнозирование микроструктуры с оценкой последующих механических свойств черных и цветных сплавов, как в литом состоянии, так и после термообработки [12]. Это позволяет точно выбрать параметры термообработки (в том числе, встроенной в литейный процесс) для получения требуемых свойств заготовок из аусферритного ЧШГ. Используя эту возможность, отливки из таких ЧШГ могут быть спроектированы со свойствами, превосходящими свойства стальных заготовок, так как отливки из ЧШГ типа ADI являются более легким и прочным для тех же целей. Моделированием также оптимизируют конструкцию отливки и производительность процесса ее производства, глубже раскрывая возможности рассматриваемых материалов для машиностроения.

Способ позволяет для большинства литейных предприятий получать отливки из аусферритного (бейнитного) ЧКГ из литого состояния без применения дополнительной термообработки – вторичной операции, повышающей затраты и длительность производства, создавая существенную конкуренцию прокату легированных сталей и стальным поковкам путем снижения себестоимости получения равноценных по служебным свойствам заготовок.



Список литературы

1. *Полухин М. С.* Разработка и использование чугунов с шаровидным графитом с повышенными механическими и триботехническими свойствами / М. С. Полухин: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. – Брянск, 2009. – 148 с.
2. *Покровский А. И.* Использование высокопрочного бейнитного чугуна для изготовления зубчатых колес / А. И. Покровский, Л. Р. Дудецкая // *Литье и металургия*. – 2015. – № 2. – С. 126-136.
3. *Бобро Ю. Г.* Изотермическая закалка чугуна / Ю. Г. Бобро, В. М. Пивоваров. – Харьков: Прапор, 1968. – 112 с.
4. Пат. 61 33361 Япония, С22 С37/04, С21 D5/00. Бейнитный высокопрочный чугун / Исихира Тосиака, Икудзима Кадзутаиэ, Маямото Ясухиро, Судзуки Кацуми, Ниппон Гайси К.К. (Япония). – № 59-253492; Заявлено 30.11.1984; опубл. 20.06.1986.
5. Пат. 2196835 Россия, МПК С21D5/02, С21D1/20, В22D27/04. Способ получения различной структуры металлической матрицы в заготовках из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом из литого состояния / К. В. Макаренко, И. К. Кульбовский; опубл. 2003, Бюл. №2.
6. *Барский В. Т.* Некоторые особенности получения отливок при вакуумно-пленочной формовке / В.Т. Барский, В. С. Дорошенко, Н.И. Шейко // *Литейное производство*. – 1987. – № 2. – С. 38-39.

7. Макаренко К. В. Рациональное структурирование графитизированных чугунов // Труды НГТУ им. Алексеева. – 2014. – № 2 (104). – С. 196-205.
8. Дорошенко В. С. Современные тенденции конструирования опочной оснастки для ЛГМ / В.С. Дорошенко, К. Х. Бердыев // Металл и литье Украины. – 2011. – № 4. – С. 24-29.
9. Райцес В. Б. Термическая обработка: В помощь рабочему-термисту. – М.: Машиностроение, 1980. – 192 с.
10. Будрин Д. В. Водно-воздушное охлаждение при закалке / Д. В. Будрин, В. М. Кондратов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1965. – № 6. – С. 22-25.
11. Пат. 93590 Украина, МПК G01N 27/72, G01R 33/12, G01B 7/00. Спосіб визначення вмісту залишкового аустеніту у зразках з інструментальних сталей / К.С. Богдан, Ю. В. Моїсєєв, А. О. Санкін; опубл. 2011, Бюл. № 4.
12. ESI Releases New Casting Simulation Suite // <http://www.afsinc.org/content.cfm?ItemNumber=7780>.



References

1. Poluhin M. S. (2009) Razrabotka i ispolzovanie chugunov s sharovidnym grafitom s povyshennymi mekhanicheskimi i tribotekhnicheskimi svoystvami [Development and use of spheroidal graphite cast iron with increased mechanical and tribotechnical properties]. Doctor's thesis: 05.02.01. Bryansk, 148 p. [in Russian].
2. Pokrovskiy A. I., Dudetskaya L. R. (2015) Ispolzovanie vysokoprochnogo beynitnogo chuguna dlya izgotovleniya zubchatykh koles [Use of highstrength bainitic cast iron for manufacturing gear wheels]. Lite i metalurgiya, no. 2, pp. 126136. [in Russian].
3. Bobro Yu. G., Pivovarov V. M. (1968) Izotermicheskaya zakalka chuguna [Isothermal hardening of cast iron]. Harkov: Prapor, 112 p. [in Russian].
4. Pat. 61 33361 Yaponiya, S22 S37/04, S21 D5/00. Beynitnyy vysokoprochnyy chugun [Bainite high-strength cast iron]. Isihira Tosiaka, Ikudzima Kadzutaie, Mayamoto Yasuhiro, Sudzuki Katsumi, Nippon Gaysi K. K. (Yaponiya). No. 59253492; Zayavleno 30.11.1984; opubl. 20.06.1986. [in Russian].
5. Pat. 2196835 Rossiya, МПК C21D5/02, C21D1/20, B22D27/04. Sposob polucheniya razlichnoy struktury metallicheskoj matritsy v zagotovkakh iz vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom iz litogo sostoyaniya [A method for obtaining a different structure of a metal matrix in blanks made of highstrength cast iron with nodular graphite from a cast state]. K. V. Makarenko, I. K. Kulbovskiy; opubl. 2003, Byul. no. 2. [in Russian].
6. Barskiy V. T., Doroshenko V. S., Sheyko N. I. (1987) Nekotorye osobennosti polucheniya otlivok pri vakuumnoplennochnoy formovke [Some peculiarities of obtaining castings in the case of vacuum-film molding]. Liteynoe proizvodstvo, no. 2, pp. 3839. [in Russian].
7. Makarenko K. V. (2014) Ratsionalnoe strukturirovanie grafitizirovannykh chugunov [Rational structuring of graphitized cast irons]. Trudy NGTU im. Alekseeva, no. 2 (104), pp. 196-205. [in Russian].
8. Doroshenko V. S., Berdyiev K. H. (2011) Sovremennye tendentsii konstruirovaniya opochnoy osnastki dlya LGM [Modern trends in the design of the tooling for Lost Foam Casting process]. Metall i lite Ukrainy, no. 4, pp. 24-29. [in Russian].
9. Raytses V. B. (1980) Termicheskaya obrabotka: V pomosch rabochemutermistu [Thermal treatment: To help the workerthermist]. Moscow: Mashinostroenie, 192 p. [in Russian].
10. Budrin D. V., Kondratov V. M. (1965) Vodovozdushnoe ohlazhdenie pri zakalke [Waterair cooling during quenching]. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, no. 6, pp. 2225. [in Russian].
11. Pat. 93590 Ukraina, МПК G01N 27/72, G01R 33/12, G01B 7/00. Sposib viznachennya vmiсту zalyskovogo austenitu u zrazkah z instrumentalnih staley [Method of determining the residual austenite content in the samples of tool steels]. K.S. Bogdan, Yu. V. Moiseev, A. O. Sankin; opubl. 2011, Byul. no. 4. [in Ukrainian]
12. ESI Releases New Casting Simulation Suite. URL: <http://www.afsinc.org/content.cfm?ItemNumber=7780>.

Поступила 16.03.2017