

УДК 669.131.7

В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Л. Н. Сыропоршнев*, Д. С. Козак, Ю. Д. Бачинский

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ И СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ ОТБЕЛА В ОТЛИВКАХ ИЗ МОДИФИЦИРОВАННОГО В КОВШЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

Получены экспериментальные данные о влиянии содержания кремния (2,0-3,5 %) и скорости охлаждения (0,45-8,3 °С/с) на отбел отливок из модифицированного в ковше высокопрочного чугуна. Установлены особенности влияния ковшового графитизирующего модифицирования на снижение склонности к отбелу, структуру и механические свойства высокопрочного чугуна. Обоснована целесообразность получения и применения высокопрочного чугуна марки ВЧ 500-7 с повышенным содержанием кремния.

Отримані експериментальні дані про вплив вмісту кремнію (2,0-3,5 %) і швидкості охолодження (0,45-8,3 °С/с) на відбіл виливків з модифікованого у ковші високоміцного чавуну. Встановлені особливості впливу ковшового графітизуючого модифікування на зниження схильності до відбілу, структуру та механічні властивості високоміцного чавуну. Обґрунтована доцільність отримання та застосування високоміцного чавуну марки ВЧ 500-7 з підвищеним вмістом кремнію.

Experimental data about influence of the content of silicon (2,0-3,5 %) and cooling rate (0,45-8,3 C/c) on castings chilling from the high-strength cast iron modified in a ladle are received. Features of influence graphitizing modifyings in a ladle on propensity decrease to chilling, structure and mechanical properties of high-strength cast iron are established. The expediency of reception and application of high-strength iron of grade ВЧ 500-7 with the raised content of silicon is proved.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, кремний, скорость охлаждения, модифицирование, степень отбела.

Постановка проблемы в общем виде

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом является прогрессивным литым конструкционным материалом, который по сравнению со сталью позволяет создавать более сложные конструкции, обеспечивает снижение массы деталей, улучшение обрабатываемости резанием, повышение коэффициента использования металла. В мировом выпуске отливок из разных сплавов доля высокопрочного чугуна достигает 30 %. В современных технологиях для получения в чугуне шаровидного графита преимущественное распространение получило модифицирование расплава магниевыми лигатурами в ковшах [1]. Введение магния в жидкий чугун приводит к кристаллизационному переохлаждению – снижению температуры эвтектической кристаллизации на 5-30 °С в зависимости от интенсивности охлаждения расплава в предкристаллизационный период. В результа-

те переохлаждения наряду со стабильной эвтектикой «аустенит-шаровидный графит» в процессе кристаллизации может образовываться также метастабильная аустенито-цементитная эвтектика (ледебурит), а при высоких скоростях охлаждения – и первичный цементит. Образование структуры половинчатого высокопрочного чугуна крайне нежелательно, во-первых, из-за риска образования в отливках усадочных дефектов вследствие увеличения величины объемной усадки и, во-вторых, из-за необходимости проведения длительного энергоемкого высокотемпературного отжига для разложения образовавшейся при кристаллизации цементитной фазы, что значительно увеличивает расходы на получение товарной продукции. Поэтому наряду с высокой степенью сфероидизации графитных включений важнейшим показателем уровня технологии и качества высокопрочного чугуна является отсутствие первичного и эвтектического цементита в литой структуре.

Анализ последних достижений и публикаций

Прогресс машиностроения выдвигает требование расширения применения тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна, которые могут успешно конкурировать с отливками из алюминиевых сплавов. Проведенные исследования удельной (отнесенной к массе сплава) прочности и долговременной прочности литейных алюминиевых сплавов и чугунов с шаровидным графитом подтвердили техническую и экономическую перспективность применения тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна взамен алюминиевых сплавов [2].

Исследования, направленные на разработку комплекса технологических приемов по снижению склонности к отбелу и образованию усадочных дефектов модифицированного в ковше высокопрочного чугуна, проводит Норвежская фирма Elkem ASA [3]. Главной целью этих исследований является минимизация явлений образования эвтектических карбидов и усадочной пористости в процессе затвердевания отливок с толщиной стенок от 5 до 20 мм. В работе [4] проанализировано влияние модифицирования чугуна кремнемагниевого лигатурой на снижение содержания углерода. Показано, что в доэвтектических чугунах потери содержания углерода после модифицирования лигатурой составляют сотые доли процента, в эвтектических – десятые, в высокоуглеродистых – более одного массового процента. Из-за большой степени флотации углерода в шлак рекомендуется углеродный эквивалент в высокопрочном чугуне ограничивать содержанием 4,5 %. Расчетно-аналитические исследования по определению теплокINETических условий образования отбела в отливках из чугуна с шаровидным графитом проводятся в МГТУ им. Баумана [5].

В целом снижение склонности высокопрочного чугуна к отбелу достигается применением качественных шихтовых материалов с содержанием серы менее 0,015 %, что позволяет минимизировать количество вводимого в расплав магния путем оптимизации химического состава чугуна, а также проведением графитизирующего модифицирования. Несмотря на развитие поздних внековшовых методов графитизирующего модифицирования, по-прежнему широко применяется вторичное модифицирование высокопрочного чугуна в ковшах 75 %-ным ферросилицием с небольшим (0,8-3,0 %) содержанием в нем таких активных модифицирующих элементов, как кальций, алюминий и барий [6]. Модифицирующие элементы, введенные в чугун из ферросилиция, способствуют увеличению количества зародышей кристаллизации шаровидного графита, в то время как кремний, понижая растворимость углерода в расплаве, инициирует приток его атомов к имеющимся центрам кристаллизации графита. Кремний, введенный в расплав из ферросилиция, концентрируясь вблизи образовавшихся включений графита, ускоряет диффузию углерода, увеличивает скорость роста эвтектики «аустенит-шаровидный графит», что способствует ускорению процесса затвердевания, обеспечивая его завершение при температуре, превышающей температуру начала образования аустенитно-цементитной эвтектики.

Наряду с модифицированием, к главным факторам, обеспечивающим получение отливок без отбела, относится также химический состав высокопрочного чугуна. Выбор химических элементов, способствующих графитизации структуры, невелик. Это, в первую очередь, углерод и кремний, а также никель и медь. Последние два из-за высокой

стоимости применяются, главным образом, для легирования высокопрочного чугуна с целью повышения его механических свойств.

Высокое содержание углерода является определяющим условием повышения степени графитизации структуры для контролируемого снижения склонности к отбелу и уменьшения усадки высокопрочного чугуна. При высоком содержании углерода усиливается влияние на графитизацию структуры кремния, который повышает температуры эвтектического и эвтектоидного фазовых превращений и сдвигает положение критических точек С, Е, S на диаграмме Fe-C-сплавов влево в область меньших концентраций углерода [7]. Кремний повышает активность углерода как в расплаве, так и в твердом растворе, в результате чего интенсифицируются процессы графитизации. В технологиях высокопрочного чугуна оптимизация содержания кремния является важной составляющей комплекса факторов, обеспечивающих предотвращение образования отбела отливков, регулирование соотношения перлит/феррит в металлической основе, предотвращение резкого снижения ударной вязкости (охрупчивания).

Выделение нерешенной части проблемы

В технологиях высокопрочного чугуна, действующих на предприятиях Украины, как правило, применяются шихтовые материалы обычного качества, в результате чего содержание серы в расплаве перед модифицированием высокое – 0,03-0,04 %. Поэтому для получения шаровидного графита требуется вдвое большее количество модификатора с учетом расходования магния на связывание поверхностно-активной серы в сульфиды, что, в свою очередь, повышает склонность отливок из высокопрочного чугуна к отбелу. При такой технологической ситуации большинство производителей высокопрочного чугуна в Украине имеют проблему с получением тонкостенных отливок без отбела. Затраты на разложение структурно-свободных карбидов в высокопрочном чугуне термической обработкой весьма высокие в связи с необходимостью приобретения, установки и эксплуатации термических печей и расходования 350-450 кВт/ч энергии на отжиг одной тонны отливок. Поэтому очевидна актуальность исследований, направленных на решение проблемы получения без отбела тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна для двигателей внутреннего сгорания, автомобилей, тракторов, электромашин, сельхозмашин, горнодобывающего оборудования и другой техники.

Цель и методика исследований

Цель работы: исследование особенностей влияния содержания кремния и скорости охлаждения на образование отбела в отливках из модифицированного в ковше высокопрочного чугуна.

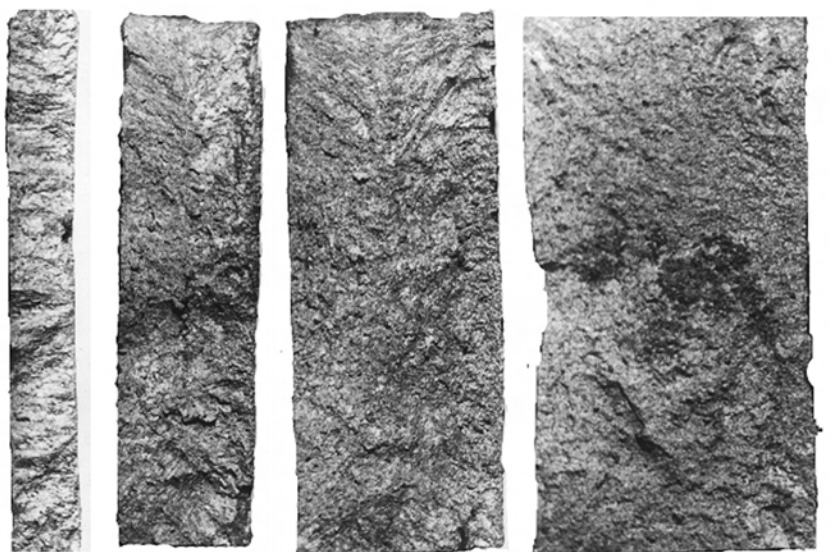
В качестве шихты применяли передельный литейный чушковый чугун марки ПЛ2 следующего химического состава, в %мас.: 4,1 С; 0,75 Si; 0,35 Mn; 0,06 Cr; 0,035 S; 0,08 P. Для получения планируемого содержания кремния в конце плавки в расплав чугуна вводили расчетное количество ферросилиция ФС75. Затем расплав модифицировали в ковше магниикальциевой лигатурой ЖКМК-4Р, содержащей в %мас.: 7,5 Mg; 7,1 Ca; 3,2 PЗМ; 48,3 Si; остальное Fe. Расход лигатуры составлял 2,5 % от массы модифицируемого расплава. В ряде опытов проводилось также графитизирующее модифицирование ферросилицием ФС75 в количестве 0,5 %. Ферросилиций для модифицирования вводили в ковш совместно с лигатурой ЖКМК-4Р. При проведении графитизирующего модифицирования ферросилицием содержание кремния в высокопрочном чугуне по сравнению с расчетным повышалось в среднем на 0,33 %. В опытных плавках расчетное содержание кремния в высокопрочном чугуне изменялась в пределах от 2,0 до 3,5 % с интервалом 0,5 %.

В каждом опыте в сырой песчаной форме отливали два комплекта пластин толщиной 5, 10, 15, 20 мм, шириной 40 мм и высотой 200 мм. Для увеличения склонности высокопрочного чугуна к образованию отбела пластины одного из комплектов отливали с применением вертикального чугунного холодильника, который контактировал с одной из меньших граней отливок. Скорости охлаждения ($V_{\text{охл}}$) опытных отливок представлены в таблице.

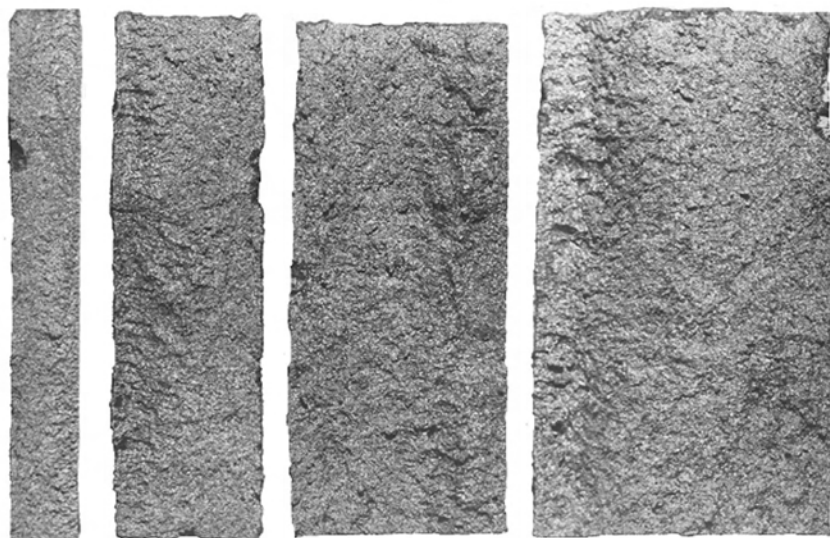
Скорость охлаждения опытных отливок

Характеристика опытных отливок	Пластины, отлитые без холодильника толщиной, мм				Пластины, отлитые с холодильником толщиной, мм			
	5	10	15	20	5	10	15	20
$V_{\text{охл}}, ^\circ\text{C}/\text{с}$	4,20	1,25	0,6	0,45	8,3	4,8	2,3	1,53

Макроструктуру оценивали по изломам пластин на середине их высоты (рис. 1). Картину изломов изображали в виде схемы расположения площадей структур серого, белого и половинчатого чугунов в плоскости поперечного сечения отливок. Степень отбела определяли как долю (%) площади, занятой отбелом, + 0,5 площади, занятой половинчатой структурой в общей площади излома. Для определения влияния кремния на механические свойства высокопрочного чугуна в каждом опыте отливали стандартные



а



б

Рис. 1. Изломы пластин толщиной 5, 10, 15, 20 мм, отлитых без холодильника из высокопрочного чугуна, содержащего 2 % Si (а) и 3 % Si (б)

клиновидные пробы с толщиной у основания 25 мм (ДСТУ 3925-99), скорость охлаждения которых составляла 0,12 °С/с.

Анализ полученных данных, обоснование научных результатов

В процессе проведения технологических операций плавки и модифицирования содержание углерода в чугуне в определенной мере уменьшалось в результате перехода в шлак и угара. В конечном итоге в проведенных опытах содержание углерода в отливках было достаточно высоким и колебалось в пределах 3,55-3,80 %, интервал варьирования содержания марганца составлял 0,31-0,42 %, серы – 0,017-0,028 %. Высокое содержание углерода и относительно низкое содержание марганца создавали благоприятные условия для выявления закономерностей влияния кремния на отбел высокопрочного чугуна в широком диапазоне скоростей охлаждения.

При расчетном содержании 2,0 % Si в двух проведенных опытах кристаллизация всех отливок проходила с образованием структуры белого и половинчатого чугунов (см. рис. 1, а). При расчетном содержании 2,5 % Si было проведено 6 опытов. В одном из них все 8 отлитые пластины имели излом серого высокопрочного чугуна. В 3-х опытах пластины, отлитые без холодильника, были без отбела, а в 2-х опытах в пластинах толщиной 5 мм наблюдался отбел глубиной 3 и 10 мм. В двух из пяти опытов в вариантах затвердевания отливок с холодильником отбел глубиной 7-10 и 2-3 мм наблюдался соответственно в пластинах толщиной 5 и 10 мм, а в 3-х опытах с холодильником во всех пластинах в зависимости от их толщины наблюдался отбел глубиной от 2 до 18 мм. Таким образом, при содержании 2,5 % Si в пластинах, отлитых без холодильника, отбел наблюдался только в пластинах толщиной 5 мм в двух из шести проведенных опытов.

При расчетном содержании 3 % Si было проведено 3 опыта. В одном из них все отливки были без отбела, в другом – отбел глубиной 9 мм образовался только в пластине толщиной 5 мм, отлитой с холодильником. В 3-м опыте в пластинах, отлитых с холодильником, глубина отбела в зависимости от толщины сечения изменялась в пределах от 1 до 5 мм. Таким образом, при содержании 3 % Si в пластинах толщиной 5, 10, 15 и 20 мм, отливаемых без холодильника, отбел не образуется (см. рис. 1, б). При содержании в высокопрочном чугуне 3,5 % Si кристаллизация всех опытных отливок проходит без образования отбела в их структуре.

Известно, что фактическое содержание кремния в высокопрочном чугуне по отношению к расчетному может варьироваться в широком диапазоне, что связано, главным образом, со значительной неравномерностью содержания кремния в ферросилиции и магниевых лигатурах на основе ферросилиция, а также межплавочными и межковшовыми колебаниями температуры жидкого чугуна при ковшовом модифицировании. В выборке проведенных опытов ширина диапазона отклонений, определенного спектральным анализом содержания кремния по отношению к расчетному, достигала 0,4-0,5 пункта, то есть находилась на уровне запланированного в опытах шага варьирования – 0,5 % Si. В результате этого диапазоны рассеивания фактического содержания кремния, определенного спектральным анализом, в частности, в опытах с расчетным содержанием 2,5 и 3,0 % Si пересекаются. Анализ взаимосвязи фактического содержания кремния в выборках опытов с расчетным содержанием 2,5 и 3,0 % Si с отбелом пластин, отлитых без холодильника, показывает, что отбел образуется эпизодически только в пластинах толщиной 5 мм при содержании 2,37-2,66 % Si, а при содержании 2,72-3,12 % Si он не образуется.

Таким образом, важным фактором снижения риска образования отбела отливок является минимизация технологического диапазона отклонения содержания кремния в высокопрочном чугуне от экспериментально установленного его оптимального содержания. На основе результатов исследования для получения в сырых песчано-глинистых формах отливок с минимальной толщиной стенок 5 мм рекомендуется применять высокопрочный чугун с содержанием 2,75-3,15 % Si.

На основе анализа выборок из опытов, в которых наблюдался отбел, установлены количественные закономерности, характеризующие влияние содержания кремния и скорости охлаждения на степень отбела высокопрочного чугуна (рис. 2). Как от-

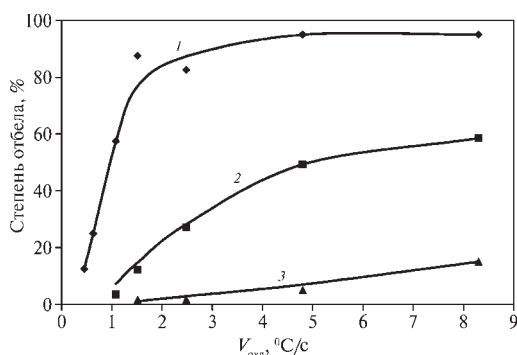


Рис. 2. Влияние содержания кремния и скорости охлаждения на степень отбела высокопрочного чугуна, % Si: 1 - 2,0; 2 - 2,5; 3 - 3,0

влияние скорости охлаждения при содержании 3,0 % Si на степень отбела, зафиксированного только в вариантах ускоренного охлаждения пластин под действием холодильника. Полученные экспериментальные данные позволяют количественно оценить, какое радикальное влияние оказывает содержание кремния на степень отбела высокопрочного чугуна.

В результате ковового графитизирующего модифицирования ферросилицием ФС75 исходного высокопрочного чугуна, содержащего 2,0 Si, степень отбела значительно снижается и становится меньше, чем у исходного высокопрочного чугуна, содержащего 2,5 % Si (рис. 3). При этом кристаллизация отливается без образования отбела. Модифицирование ферросилицием исходного высокопрочного чугуна, содержащего 2,5 % Si, также эффективно снижает степень его отбела. Отбел глубиной 6 и 10 мм наблюдался только в изломах, отлитых с холодильником пластин толщиной 10 и 5 мм соответственно. Графитизирующее модифицирование исходного высокопрочного чугуна, содержащего 3,0 % Si, обеспечивает кристаллизацию отливок без отбела во всем исследованном диапазоне скоростей охлаждения.

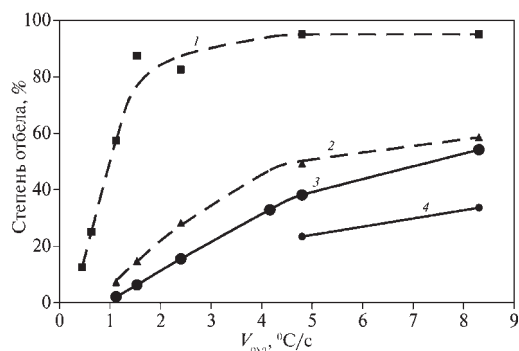


Рис. 3. Влияние скорости охлаждения отливок на степень отбела исходных высокопрочных чугунов, содержащих 2,0 % Si (1) и 2,5 % Si (2), и после их модифицирования ферросилицием ФС75, соответственно кривые 3 и 4

а показатели относительного удлинения (δ) и ударной вязкости (КС) – минимальные (рис. 4). При содержании кремния 2,5 % и более цементита в структуре отливок не было. Включения шаровидного графита имели диаметр 45–55 мкм, а плотность их распределения составляла 25–35 шт/мм². С повышением содержания кремния пропорционально увеличивается количество феррита в металлической основе вплоть до 90 % при 3,5 % Si.

мечалось ранее, в опытах с содержанием 2,0 % Si кристаллизация всех опытных отливок проходит с образованием отбела, а при скоростях охлаждения более 1 °C/c степень отбела структуры достигает 80–90 %. В опытах с содержанием 2,5 % Si из комплекта пластин, отливается без холодильника, отбел эпизодически образовывался только в пластине толщиной 5 мм. Таким образом, кривая 2 наряду с данными, полученными при охлаждении отливки с холодильником, учитывает также результаты опытов без холодильника, в которых в пластинах толщиной 5 мм наблюдался отбел. Кривая 3 описывает

Определение влияния содержания кремния на микроструктуру и механические свойства высокопрочного чугуна проводилось на образцах, вырезанных из клиновидных отливок толщиной у основания 25 мм, массой 7 кг. При содержании 2,0 % Si в структуре клиновидных отливок наряду с шаровидным графитом имелся эвтектический цементит в количестве от 5 до 8 %, а количество феррита в металлической основе было минимальным (40 %) для анализируемой выборки опытов. В результате сочетания указанных факторов показатели предела прочности при растяжении (σ_B) и твердости (НВ) имеют максимальные значения,

Кривые, описывающие изменения σ_b и НВ, имеют минимум, а δ и КС – максимум. Такая закономерность изменения механических свойств объясняется двойственным характером влияния кремния: с одной стороны, он способствует ферритизации металлической основы, снижая до определенного уровня прочность и повышая пластичность и вязкость, а с другой стороны, в результате увеличения степени легирования кремнием с определенного момента начинает проявляться явление упрочнения и охрупчивания феррита. В диапазоне содержания 2,5-3,0 % Si обеспечивается весьма благоприятное сочетание показателей механических свойств высокопрочного чугуна в литом состоянии: $\sigma_b > 500$ МПа; НВ < 2000 МПа; $\delta > 12$ %; КС > 40 Дж/см². При повышении содержания кремния до 3,5 % наблюдается незначительный рост прочности и твердости, немного уменьшается относительное удлинение и резко, более чем в 2 раза, снижается ударная вязкость.

В результате графитизирующего модифицирования (рис. 4) в высокопрочном чугуне, содержащем 2,0 % Si, снижаются прочность, твердость, увеличиваются относительное удлинение и ударная вязкость. В диапазоне содержания 2,5-3,0 % Si в результате графитизирующего модифицирования повышается относительное удлинение высокопрочного чугуна, изменение других показателей механических свойств незначительно.

Выводы

На основе результатов экспериментального исследования установлено, что для получения в сырых песчаных формах без отбела отливок с минимальной толщиной стенок 5 мм из модифицированного в ковше высокопрочного чугуна содержание кремния в нем должно составлять $3,0 \pm 0,25$ %. Для сглаживания негативного влияния возможных эпизодических отклонений в сторону более низких значений содержания кремния рекомендуется проводить графитизирующее модифицирование высокопрочного чугуна ферросилицием ФС75, который может вводиться в ковш совместно с магниевой лигатурой. В случаях отклонений в сторону больших

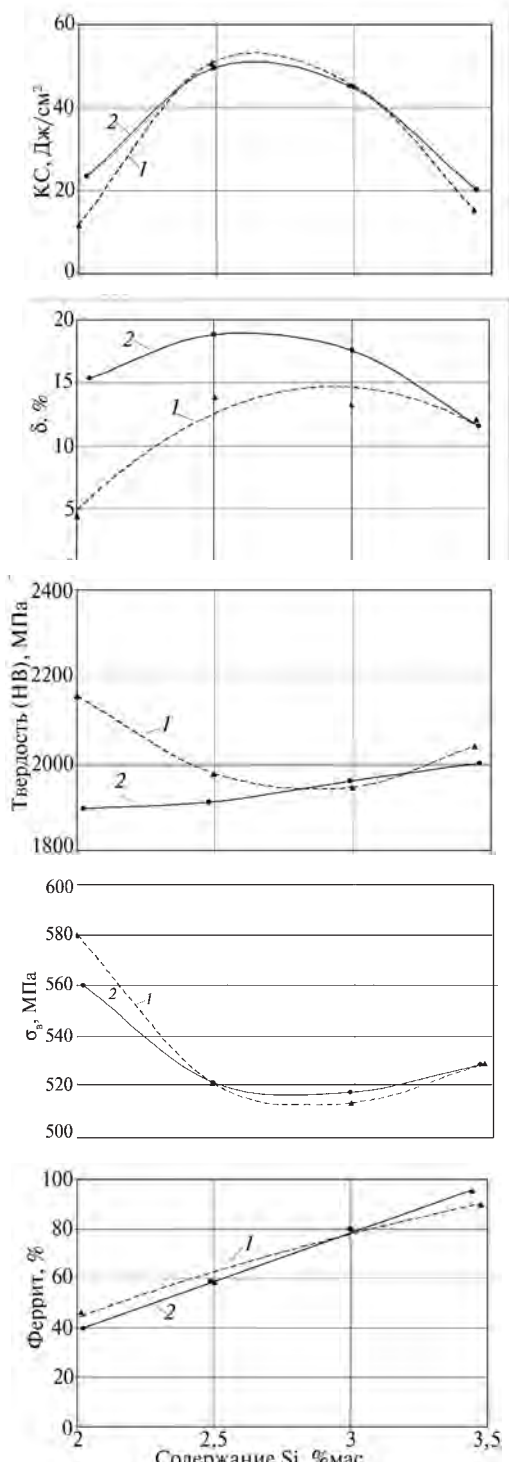


Рис. 4. Влияние кремния на количество феррита и механические свойства исходного высокопрочного чугуна (1) после его графитизирующего ковшового модифицирования ферросилицием ФС75 (2)

концентраций кремния (до 3,5 %) ударная вязкость и относительное удлинение снижаются, но остаются на достаточно высоком уровне для высокопрочного чугуна марки ВЧ 500-7, получаемой в литом состоянии. Опыт промышленного опробования подтверждает целесообразность получения и применения высокопрочного чугуна марки ВЧ 500-7 с повышенным содержанием кремния по сравнению с рекомендациями стандартов (ГОСТ 7293-85; ДСТУ 3925-99) в результате чего обеспечивается эффективное снижение склонности тонкостенных отливок к отбелу, уменьшается их твердость и улучшается обрабатываемость резанием на станках-автоматах.



Список литературы

1. Lerner Y. S. Overview of ductile iron treatment methods // Foundry Trade journal. — 2003. — V. 177. — P. 25-27.
2. Lightweight iron castings — can they replace aluminum castings? // Foundryman. — 2003. — Vol. 96, № 9. — С. 221-224.
3. Torbjorn Skaland. A new method for chill and shrinkage control in ladle treated ductile iron // Foundry Trade Journal. — 2004. — № 12. — P. 396-400.
4. *Большаков Л. А., Жерлицина О. В.* О снижении содержания углерода при модифицировании чугуна кремнемагниевого лигатурой // Вісник Приазовського держ. техн. ун-ту. — 2007. — № 17. — С. 35-39.
5. *Вольнов И. Н.* Компьютерное моделирование кинетики кристаллизации отливки из чугуна с шаровидным графитом // Литейн. пр-во. — 2004. — № 2. — С. 31-36.
6. *Csonka J. M. et. el.* Ductile Iron Trends: reducing costs, Improving Quality // Modern Casting. — 2002. — № 5. — P. 27-29.
7. Справочник по чугунному литью / Под ред. Н. Г. Гиршовича — Л.: Машиностроение, 1978. — С. 7-10.

Поступила 12.01.2009

УДК 621.74.94:669.131.7.061.062

Г. Д. Хуснутдинов, Б. Г. Зеленый

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ ЧУГУНА НИТРИДОМ МАГНИЯ

Исследованы рафинирующая и сфероидизирующая способности реагента, содержащего нитрид магния, в широком интервале интенсивности его взаимодействия с расплавом чугуна.

Досліджені рафінуюча і сфероїдизуюча здатності реагенту, що містить нітрид магнію, в широкому інтервалі інтенсивності його взаємодії з розплавом чавуну.

Fining and spheroidizing capability of the reagent containing magnesium nitride was analyzed in terms of broad intensity range of interaction between the reagent and cast iron melt.

Ключевые слова: рафинирование чугуна, модифицирование, нитрид магния, диссоциация, магнеемкость.