

УДК 621.745.55

Радченко К. С., Ямшинский М. М., Федоров Г. Е.

**ВЛИЯНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКОГО ХРОМОМАНГАНЦЕВОГО
ЧУГУНА**

Абразивный износ – основной вид износа большой группы машин и оборудования, связанных с добычей, перемещением и переработкой абразивных материалов. В сложных условиях абразивного износа работают экскаваторы, погрузчики, мельницы для размола руды, угля, цемента, течи, лотки, желоба, футеровочные плиты бункеров и скипов, шламовые насосы и трубопроводы к ним, центрифуги, классификаторы, флотационные машины, гидроциклоны и т. д. [1].

Для изготовления деталей машин и механизмов, работающих в абразивных средах, широкое применение получили белые чугуны. При работе без значительных ударных нагрузок стойкость таких чугунов позволяет в 3–15 раз увеличить срок службы деталей по сравнению с углеродистыми сталями, сталями типа 110Г13Л и др. сплавами [1], которые традиционно применяют в промышленности.

В условиях абразивного и гидроабразивного изнашивания максимальную износостойкость имеют белые высоколегированные чугуны, в частности высокохромистые. Высокая стойкость этих чугунов в условиях абразивного изнашивания обеспечивается наличием в структуре твердой составляющей – карбидов, которые закреплены в более мягкой, но прочной матрице.

Высокохромистые белые износостойкие чугуны занимают одно из первых мест среди чугунов со специальными свойствами [2]. Главными потребителями таких сплавов являются добывающая, перерабатывающая, химическая, металлургическая, теплоэнергетическая и др. отрасли промышленности. Так, например, в теплоэнергетике в системах гидрозолоудаления тепловых электростанций в тяжелых условиях абразивного и гидроабразивного износа работают витки шнеков шламовых транспортеров, колеса, бронедиски и корпуса багерных насосов, колена пульповых трубопроводов и т. д.

В Западной Европе, США, Австралии и других развитых странах в качестве износостойких сплавов для работы в абразивных и гидроабразивных средах наиболее часто используют высокохромистые, хромомолибденовые, хромоникелевые и другие белые износостойкие чугуны, которые обязательно содержат в своем составе дорогие и дефицитные элементы (Mo, Ni, Cu) или повышенное содержание Cr (25–33 %) [3].

Использование дорогих легирующих элементов зачастую определяется разными причинами: необходимым уровнем эксплуатационных свойств литых деталей в тех или иных условиях, технологичностью сплавов при их производстве и обработке, стоимостью шихты и нередко конъюнктурными соображениями. Однако многие исследования показали возможность взаимозаменяемости дорогих и дефицитных элементов на более дешевые. Так, например, исследователи [4] доказали, что молибден не оказывает какого-то специфического, только ему свойственного влияния, на износостойкость, прочность, прокаливаемость и другие свойства белых износостойких чугунов.

В отечественной и зарубежной практике накоплен значительный положительный опыт по использованию экономно легированных высокохромистых и хромоманганцевых чугунов в качестве износостойких сплавов. Однако остается нерешенным ряд проблем для этих чугунов: относительно невысокие износостойкость и механические свойства, склонность к образованию трещин в отливках в процессе кристаллизации и термической обработки, высокие линейная и объемная усадки, сложность механической обработки и др.

Улучшить технологические и эксплуатационные свойства белого высокохромистого чугуна можно с помощью управления процессами формирования структуры и свойств металла в отливках определением соотношения в них основных химических элементов, комплексным их легированием, микролегированием и модифицированием, изменением условий кристаллизации металла в отливках и режимами их термической обработки.

Эксплуатационные и механические свойства белых износостойких чугунов зависят прежде всего от карбидной фазы. Большое количество твердых и хрупких карбидных фаз определяет низкие пластические свойства чугунов, однако при условии прочной связи их с матрицей сплава такие фазы значительно повышают сопротивление металла абразивному воздействию. Размер и равномерность распределения карбидных включений также значительно влияет на уровень абразивной износостойкости чугунов.

Высоким требованиям износостойкости в абразивных и гидроабразивных средах соответствуют хромомарганцевые чугуны с карбидами Me_7C_3 . Эти чугуны прошли широкую исследовательскую и промышленную апробацию. В Украине нет запасов дорогих никеля, молибдена, меди и других элементов, стоимость которых постоянно повышается, но зато есть значительные запасы марганцевых, титано-циркониевых и др. руд, которые можно использовать при производстве ферросплавов для белых износостойких чугунов, поэтому хромомарганцевые чугуны являются перспективным износостойким материалом.

Поскольку хром и марганец относятся к группе карбидообразующих элементов, но по-разному влияют на свойства металлической основы, важной задачей является определение оптимальных концентраций этих элементов в чугуне с целью получения максимальной износостойкости и сохранения удовлетворительных литейных и механических свойств.

Целью данной работы является определение оптимального содержания хрома и марганца, как базовых элементов, для экономнолегированного чугуна, который имел бы высокую износостойкость в гидроабразивных средах, а также изучить влияние процессов микролегирования и модифицирования на структуру и свойства базового чугуна с оптимальным содержанием хрома и марганца.

Для исследования влияния хрома, марганца, титана, бора, сурьмы и РЗМ использовали чугун, содержащий, %: 2,8–3,3 С; 0,5–0,8 Si; 0,5–0,9 Mn; $\leq 0,05$ P; $\leq 0,05$ S. Плавку сплавов производили в индукционной печи ИСТ-006 с кислой футеровкой емкостью тигля 60 кг. Чугун заливали в сухие песчано-глинистые формы при температуре 1420 ± 10 °С.

Износостойкость исследовали методом вращения призматических образцов в гидроабразивной среде, в качестве которой использовали смесь воды и карьерного кварцевого песка в соотношении 1:1 по объему. Схема установки для исследования изнашивания и размеры образцов показаны на рис. 1. Одновременно износу подвергали 4 образца: один эталонный и три исследуемых. В качестве эталонного образца использовали образец из хромоникелевого чугуна 280X28H2. Эталон является износостойким сплавом, широко применяемым в промышленности, но содержащим дорогой никель и повышенное содержание хрома. Кроме этого чугун 280X28H2 имеет ряд недостатков при производстве из него литых деталей и их эксплуатации, характерных для большинства высокохромистых чугунов.

Коэффициент относительной износостойкости определяли как отношение потерь масс эталонного образца к исследуемому. Образцы взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,0001 г.

Для изучения влияния хрома на твердость и износостойкость использовали чугун, легированный марганцем в количестве 3,5–4,0 %. Содержание хрома изменяли от 5,2 до 31,5 %. Результаты исследований показано на рис. 2, а.

Увеличение концентрации хрома до 12 % повышает твердость и износостойкость чугуна вследствие повышения твердости карбидов цементитного типа, входящих в состав ледебурита. Дальнейшее повышение содержания хрома до 22,5 % существенно улучшает

твердость и износостойкость марганцевого чугуна, поскольку происходит инверсия эвтектики ледебуритного типа на аустенитную хромистокарбидную, которая представляет собой разветвленный каркас карбидов типа Cr_7C_3 , закрепленных в аустенитной матрице.

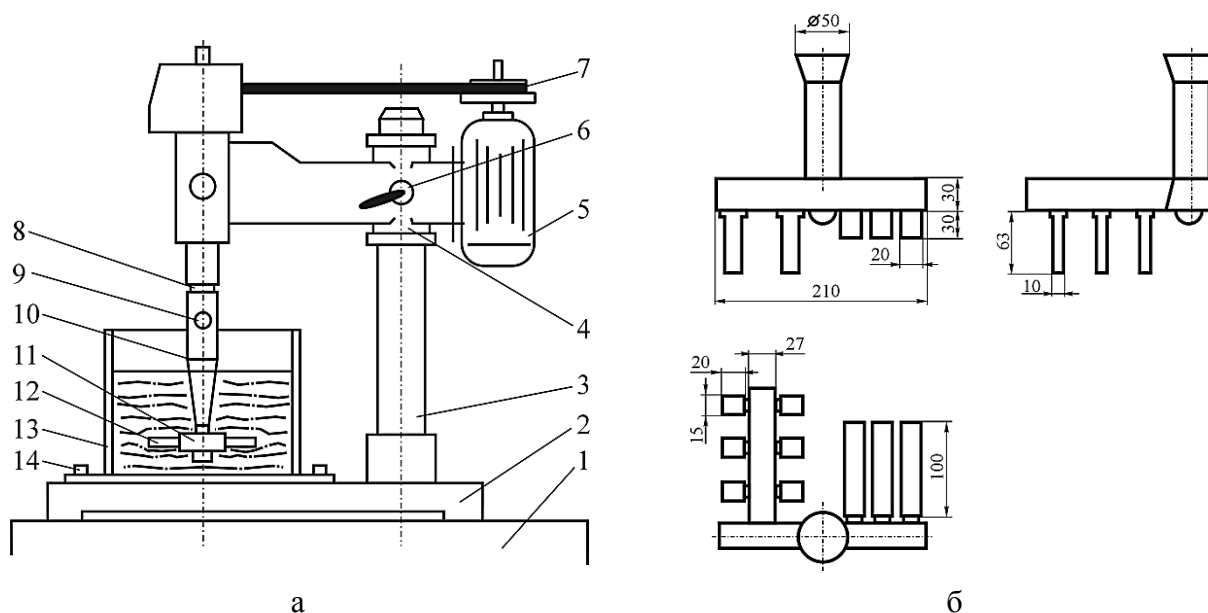


Рис. 1. Схема установки для исследования износостойкости сплавов в гидроабразивной среде (а) и технология изготовления образцов (б):

1 – основание; 2 – стол; 3 – колонна; 4 – траверса; 5 – электродвигатель; 6 – рукоятка фиксирования траверсы; 7 – клиноременная передача; 8 – шпиндель; 9 – узел крепления рабочего вала; 10 – рабочий вал; 11 – кассета; 12 – образец; 13 – ванна с крышкой; 14 – болты для крепления ванны

Повышение концентрации хрома более 23 % в чугуне увеличивает количество крупных заэвтектических карбидов типа Cr_7C_3 , которые кристаллизуются в виде длинных шестигранников и при действии на них абразивной частички легко выкрашиваются из металлической матрицы. Кроме этого в структуре чугуна при повышенном содержании хрома образуется высокохромистый карбид типа $Cr_{23}C_6$, микротвердость которого ниже чем у карбида типа Cr_7C_3 . Поэтому, несмотря на повышение твердости, износостойкость чугуна падает.

Таким образом, для выплавки белых марганцевых чугунов с максимальной износостойкостью (выше чем чугуна 280X28H2 на 15–22 %), в их составе должно быть от 18 до 22 % хрома.

Влияние марганца на свойства высокохромистого чугуна (содержание хрома 19–21 %) исследовано в диапазоне концентраций от 2,0 до 12,2 %. Результаты исследований показано на рис. 2, б.

Марганец способствует стабилизации аустенита в белом чугуне, поэтому с повышением его содержания твердость сплава снижается, а износостойкость при этом уменьшается, и при содержании марганца около 9 % она становится меньшей, чем сплава 280X28H2. Однако марганец повышает прокаливаемость хромистых чугунов [1], и при незначительных его концентрациях остаточный аустенит в чугуне способен упрочняться под действием микроскопических ударов абразивных частиц. Следовательно, для достижения высокой износостойкости высокохромистого чугуна его необходимо легировать 3,5–4,5 % марганца.

По результатам исследований рекомендован базовый хромомарганцевый чугун с содержанием 19–21 % хрома и 3,3–5,0 % марганца, которому соответствует марка 290X19Г4.

Исследовано влияние процессов микролегирования и модифицирования на структуру и свойства хромомарганцевого чугуна рекомендуемого состава.

Для микролегирования использовали титан, сурьму, для модифицирования – бор и РЗМ.

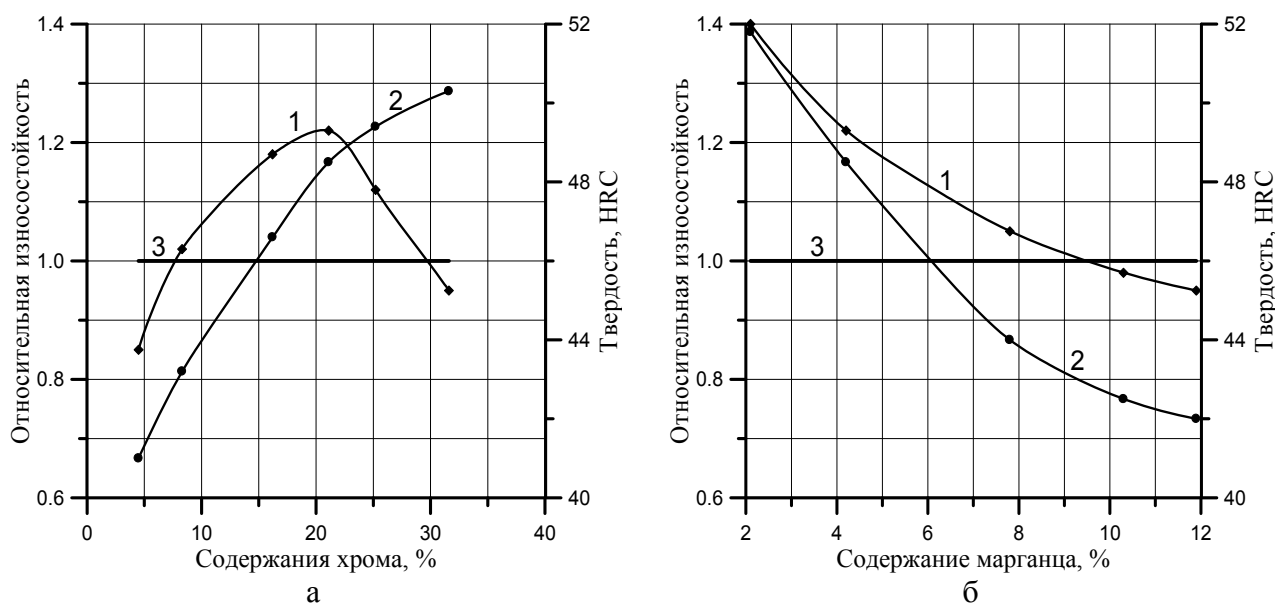


Рис. 2. Влияние хрома (а) и марганца (б) на твердость и износостойкость высоколегированного чугуна:

1 – относительная износостойкость; 2 – твердость, HRC; 3 – эталон (чугун 280X28H2)

Титан вводили в базовый хромомарганцевый чугун в диапазоне концентраций до 1,2 %. Титан имеет высокое сродство к кислороду, поэтому его вводили после полного раскисления сплава алюминием. При кристаллизации титан образует, прежде всего, карбиды и карбонитриды, если в сплаве присутствует азот. Титан имеет особенность переохлаждать жидкий чугун, что способствует растворению карбидов титана в расплаве и выделению их во время кристаллизации, а не до нее.

Существенное повышение эксплуатационных и механических свойств сплава получено при содержании 0,4–0,5 % титана (рис. 3, а). Дальнейшее увеличение содержания титана в износостойком чугуне уменьшает твердость и износостойкость, хотя последняя остается выше, чем у сплава 280X28H2. Следовательно, для улучшения эксплуатационных характеристик хромомарганцевого чугуна его целесообразно микролегировать титаном в пределах 0,1–0,5 %.

Влияние сурьмы на свойства хромомарганцевого чугуна исследовано в диапазоне концентраций до 1,0 % (по присадке). Поскольку сурьма имеет невысокую температуру плавления, ее вводили в ковш перед заполнением его расплавом.

Малые присадки сурьмы (0,15 %) в хромомарганцевый чугун способствуют повышению твердости и износостойкости сплава (рис. 3, б). Это объясняется тем, что сурьма влияет не только на эвтектическое превращение, но и на кристаллизацию аустенита. В количествах 0,4–0,8 % в тонкостенных отливках сурьма устраняет дендритное строение избыточного аустенита. Сурьма сдвигает эвтектическую точку в сторону меньшего содержания углерода и этим увеличивает количество эвтектики и измельчает ее. Дальнейшее увеличение присадки сурьмы резко уменьшает износостойкость сплава. Это объясняется тем, что в таких количествах сурьма способствует образованию не мелкодисперсной эвтектики, а сплошного поля структурно-свободного цементита, который имеет ослабленную связь с матрицей сплава и легко выкрашивается при воздействии на поверхность детали абразива. Следовательно, для повышения износостойкости хромомарганцевого чугуна его целесообразно дополнительно микролегировать сурьмой в количестве 0,10–0,15 % (по присадке) перед заливкой в формы.

Влияние модифицирования бором на эксплуатационные характеристики хромомарганцевого чугуна изучено в диапазоне концентраций до 0,1 % (по присадке). Установлено, что дополнительная обработка чугуна бором существенно повышает твердость и износостойкость металла (рис. 4, а).

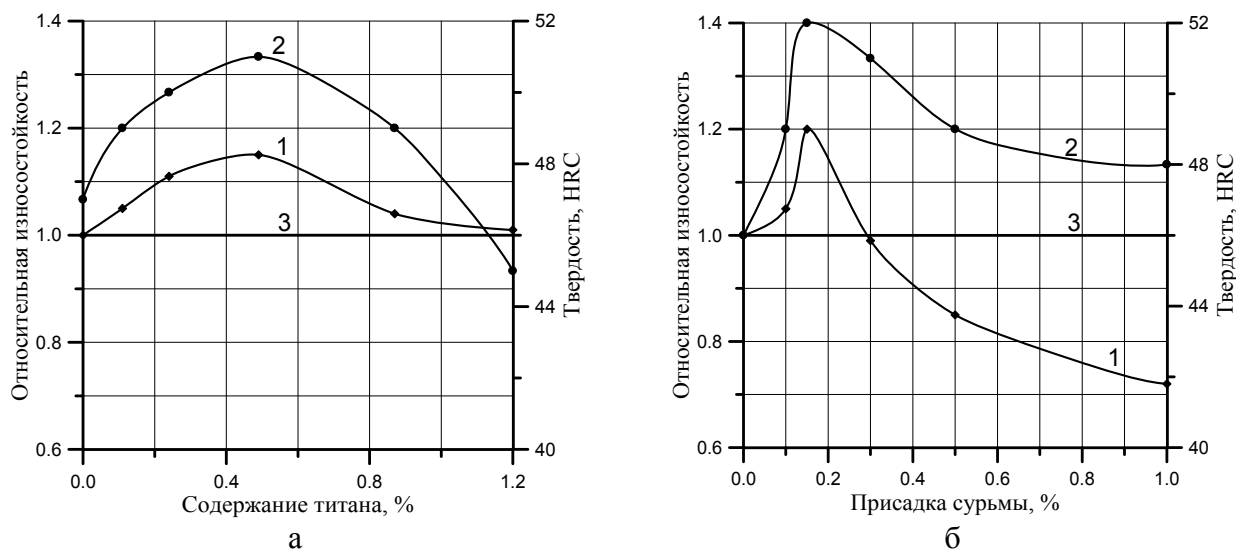


Рис. 3. Изменение свойств хромомарганцевого чугуна в зависимости от содержания в нем титана (а) и сурьмы (б):

1 – относительная износостойкость; 2 – твердость, HRC; 3 – эталон (чугун 280X28H2)

Бор, как поверхностно-активный элемент, оказывает сильное влияние на процессы кристаллизации чугуна, улучшает состояние границ зерен, измельчает их и дополнительно раскисляет металл, что положительно влияет на процесс производства отливок и их эксплуатационные свойства. Бор также уменьшает размеры эвтектических колоний и устраняет транскристаллизацию в белых чугунах [5]. Улучшение технологических и эксплуатационных свойств чугуна после добавления бора снижает содержание хрома, марганца, никеля и других элементов. Однако по результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что к обработке чугуна бором надо подходить достаточно осторожно, поскольку уже при содержании 0,03 % бора чугун имеет хрупкий излом при комнатной температуре, а его износостойкость практически остается без изменений.

Отливки из износостойкого хромомарганцевого чугуна, модифицированного бором в количестве более 0,03 %, также могут работать в условиях абразивного и гидроабразивного изнашивания, но с гарантированным отсутствием ударных нагрузок и при минимальных углах атаки абразива на поверхность детали.

Для модифицирования хромомарганцевого чугуна редкоземельными металлами использовали ферроцерий, содержащий 45–50 % Ce, 27–32 % La, 12–13 % Nd и 5–12 % др. элементов. Учитывая низкую температуру плавления, редкоземельный сплав вводили в ковш перед заливкой его металлом.

Суммарное содержание РЗМ изменяли до 0,8 % (по присадке). Влияние РЗМ на твердость и износостойкость базового хромомарганцевого чугуна представлено на рис. 4, б. Установлено, что присадка РЗМ уменьшает не только размеры карбидов Cr_7C_3 , но и подобно сурьме влияет на строение дендритов аустенита, измельчая их и придавая им форму, близкую к шаровидной. Максимальная твердость и износостойкость хромомарганцевого чугуна зафиксирована при содержании 0,2–0,4 % РЗМ (по расчету). Дальнейшее увеличение присадки до 0,8 % понижает эти характеристики до начального уровня. Таким образом, для повышения износостойкости хромомарганцевый чугун необходимо модифицировать присадками РЗМ в количестве 0,2–0,4 %.

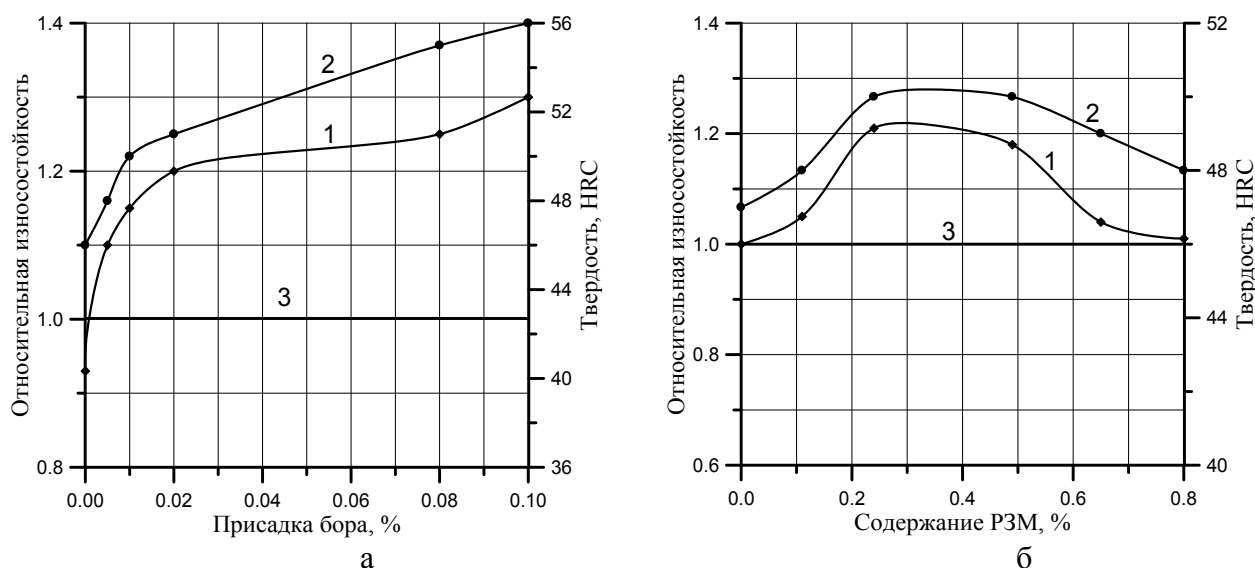


Рис. 4. Влияние бора (а) и РЗМ (б) на твердость и износостойкость хромомарганцевого чугуна:

1 – относительная износостойкость; 2 – твердость, HRC; 3 – эталон (чугун 280X28H2)

ВЫВОДЫ

При производстве отливок из белых износостойких высоколегированных чугунов необходимо точно знать и соблюдать соотношение между основными легирующими элементами – хромом и марганцем.

Наивысшие эксплуатационные характеристики хромомарганцевых чугунов можно получить при содержании в них хрома в пределах 19–22 %, а марганца – 3,3–5,0 %.

Для повышения износостойкости базового хромомарганцевого чугуна 290X19Г4 его необходимо дополнительно микролегировать титаном в количествах 0,3–0,5 %, сурьмой в количествах 0,10–0,15 % (по присадке).

Для модифицирования структуры хромомарганцевого чугуна необходимо использовать бор в количествах 0,005–0,02 % или РЗМ в количествах 0,2–0,4 % (по присадке).

Исследованные чугуны имеют высокие эксплуатационные характеристики в абразивных и гидроабразивных средах и могут быть использованы вместо широко применяемого сплава типа 280X28H2, содержащего дорогой никель.

Микролегированные и модифицированные хромомарганцевые чугуны имеют удовлетворительные литейные свойства (жидкотекучесть – длина спирали 520–650 мм; линейная усадка 1,84–2,25 %; объемная усадка 7,5–8,1 %), что дает возможность изготавливать промышленные отливки любых масс, геометрии и толщины стенок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарбер М. Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация / М. Е. Гарбер. – М. : Машиностроение, 2010. – 280 с. : ил.
2. Высокохромистый чугун как материал для быстроизнашиваемых деталей машин / Комаров О. С., Урбанович Н. И., Комаров Д. О., Волосатиков В. И., Лифищ Г. Ф. // Литейное производство. – 2008. – № 2. – С. 2–4.
3. Warman slurry pumping handbook. Warman international ltd. Pp. 48–50 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.weirminerals.com>.
4. Цыпин И. И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства / И. И. Цыпин. – М. : Metallurgia, 1983. – 176 с.
5. Шерман А. Д. Чугун: справ. изд. / А. Д. Шерман, А. А. Жуков. – М. : Metallurgia, 1991. – 576 с.

Статья поступила в редакцию 04.11.2011 г.