



УДК 621.744.07

Поступила 05.10.2013

М. М. ЯМШИНСКИЙ, К. С. РАДЧЕНКО, Г. Е. ФЕДОРОВ,  
Е. А. ПЛАТОНОВ, Национальный технический университет Украины «КПИ»

## СЛУЖЕБНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ И МОДИФИЦИРОВАННЫХ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

*Изучено влияние хрома и марганца в широком диапазоне их концентраций на износостойкость белых чугунов для изготовления литых деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного и гидроабразивного износа. Установлено, что при оптимальном соотношении этих элементов чугуны имеют высокие твердость, износостойкость и удовлетворительные литейные свойства, позволяющие изготавливать литые детали различные по массе, геометрии и габаритных размеров. Исследовано влияние процессов микролегирования и модифицирования на эксплуатационные свойства рекомендованного хромомарганцевого чугуна 290X19Г4 и установлена целесообразность использования этих процессов при производстве износостойких отливок с учетом конкретных условий эксплуатации.*

*Influencing of chrome and manganese in the wide range of their concentrations on wear proof of white cast-irons for making of the poured details working in the conditions of intensive abrasive and hydroabrasive wear is studied. It is set that at optimum correlation of these elements cast-irons have high hardness, wearproof and satisfactory casting properties, allowing to make the poured details of different mass, geometry and overall sizes. Influence of processes of микролегирования and modification is explored on operating properties of the recommended Cr-Mn cast-iron 290X19Г4 and expedience of the use of these processes is set at production of the wearproof foundings taking into account concrete external environments.*

В мировой практике накоплен значительный опыт применения в качестве износостойких материалов высокохромистых, хромомарганцевых, хромоникелевых и других чугунов для изготовления литых деталей машин и механизмов, работающих в абразивных и гидроабразивных средах. Однако проблемы остаются, поскольку с каждым годом ужесточаются условия эксплуатации таких машин, увеличиваются объемы производства продукции и др.

Для изготовления литых деталей, работающих в условиях гидроабразивного износа, используют высоколегированный белый чугун 280X28H2, недостатками которого являются содержание дорогого и дефицитного никеля, а также плохая обрабатываемость на металлорежущих станках.

Открытым остается вопрос выбора материалов для изготовления литых деталей шнековых классификаторов, колес, крышек и корпусов багерных и шламовых насосов, импеллеров флотационных машин и деталей иного оборудования обогатительных фабрик, шаровых мельниц, лопаток дробебетонных аппаратов и др.

Работа выполнялась применительно к условиям эксплуатации литых деталей систем гидрозолоудаления (ГЗУ) тепловых электростанций, где наиболее быстро изнашиваются витки шнеков шламовых транспортеров, колеса и корпуса багер-

ных насосов, колена пульповых трубопроводов и др. Анализом эксплуатации этих деталей установлено, что сопротивление металла гидроабразивному изнашиванию зависит от состояния металла – его химического состава, структуры, режимов термической обработки, которые придают ему высокую твердость, с одной стороны, и условий эксплуатации деталей, с другой.

Следует отметить, что износ в гидроабразивных средах является сложной и неоднозначной функцией условий взаимодействия металла детали с абразивными частицами и средой. Он зависит от многих факторов: продолжительности эксплуатации, концентрации абразива в жидкости, размера, формы и твердости абразивных частиц, их скорости в момент удара о поверхность детали, угла атаки частицами изнашиваемой поверхности, снижения механических свойств материала вследствие разупрочняющего воздействия на него среды и др. Кроме того, в последние годы на длительность эксплуатации деталей машин систем ГЗУ существенное влияние оказывает использование некондиционного топлива на тепловых электростанциях, что сопровождается значительным увеличением количества шлака.

Поскольку управлять перечисленными факторами в условиях производства практически невоз-

можно, остается только одно – улучшение свойств материала, т. е. его эксплуатационных характеристик.

Одним из направлений решения такой задачи может быть использование теоретических и технологических разработок управления процессами формирования структуры и свойств металла в отливках из белых чугунов определением соотношения в них основных химических элементов, комплексным их легированием, микролегированием и модифицированием, изменением условий кристаллизации металла в отливках и режимами их термической обработки.

Спроектировать и изготовить экспериментальную установку для исследования поведения металла в гидроабразивной среде с учетом перечисленных выше факторов практически невозможно, поэтому нами разработана установка, в которой применяется метод вращения образцов в пульпе. С помощью клиноремной передачи на установке можно изменять скорость вращения вала от 385 до 3375 мин<sup>-1</sup>.

В качестве гидроабразивной среды (пульпы) использовали смесь кварцевого карьерного песка и воды в различных пропорциях, а в качестве эталона сравнения износа – образцы, изготовленные из хромоникелевого сплава 280X28H2.

Литейные и механические свойства определяли с использованием стандартных и усовершенствованных методик.

Сплавы выплавляли в индукционной печи ИСТ-0,06 с основной футеровкой. Структуру изучали на микроскопах МИМ-8 и NEOFOT-21.

Как уже отмечалось, в промышленных условиях в качестве материала для изготовления литых деталей, работающих в условиях гидроабразивного износа, используют высоколегированный хромоникелевый чугун 280X28H2, который содержит в своем составе дорогой и дефицитный никель, и имеет плохую обрабатываемость на металлорежущих станках. Поэтому теоретический и практический интерес представляют исследования свойств

и структуры других белых чугунов, например хромомарганцевых.

Известно, что эксплуатационные и механические свойства белых износостойких чугунов [1–3] зависят в первую очередь от карбидной фазы. Большое количество твердых и хрупких карбидных фаз определяет низкие пластические свойства чугунов, однако при условии прочной связи их с матрицей сплава значительно повышает сопротивление металла абразивному воздействию.

Поскольку хром и марганец относятся к группе карбидообразующих элементов, то теоретический и практический интерес представляют исследования, направленные на определение оптимальных концентраций этих элементов в чугуне с целью получения максимальной износостойкости и сохранения удовлетворительных литейных и механических свойств.

Исследованиями влияния хрома на износостойкость белого чугуна с содержанием около 4% марганца установлено, что наивысшую (на 20–25% выше, чем чугуна 280X28H2) износостойкость имеет чугун с содержанием 17–22% хрома (рис. 1, а). Несмотря на дальнейший рост твердости после повышения содержания хрома вследствие увеличения и коагуляции карбидов хрома цементитного типа, износостойкость чугуна уменьшается, поскольку увеличивается ферритная составляющая в матрице металла.

Марганец способствует стабилизации аустенита в белых чугунах, поэтому с увеличением его содержания в хромистом чугуне твердость снижается (рис. 1, б) вследствие увеличения остаточного аустенита в основе металла. Износостойкость сплава при этом также уменьшается и уже при содержании марганца около 9% она становится меньшей, чем сплава 280X28H2.

Таким образом, по результатам исследований предложен базовый хромомарганцевый чугун с содержанием 18–20% хрома и 3,8–4,5% мар-

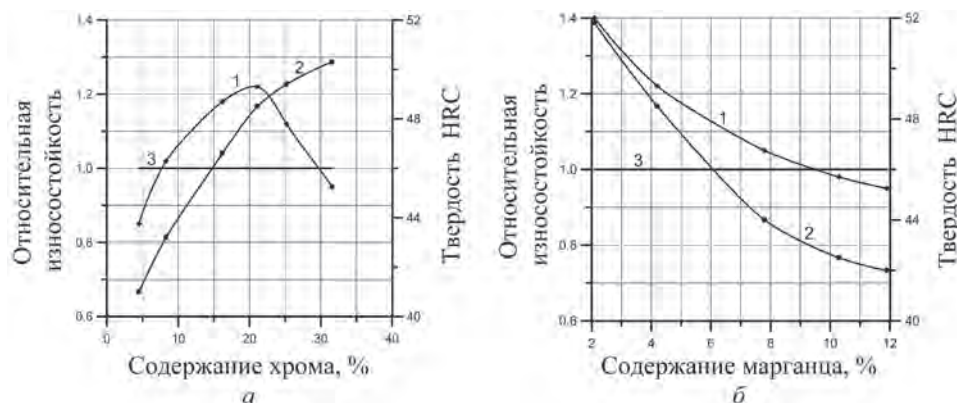


Рис. 1. Изменение твердости и износостойкости белых чугунов в зависимости от содержания в них хрома (а) и марганца (б): 1 – относительная износостойкость; 2 – твердость; 3 – эталон 280X28H2

ганца, которому предварительно присвоена марка 290X19Г4.

В производственных условиях часто используют в качестве шихтовых материалов детали багерных и иных насосов, которые отработали свой ресурс и содержат в своем составе определенное количество никеля, поэтому практический и теоретический интерес представляет изучение влияния никеля на свойства базового чугуна 290X19Г4.

Легирование чугуна никелем способствует стабилизации аустенита и расширяет область  $\gamma$ -Fe. В то же время увеличение количества аустенита в белых чугунах заметно снижает их стойкость против износа. Поэтому количество аустенита в них должно определяться тем минимумом, при котором сохраняются необходимые прочность и износостойкость во время эксплуатации литых деталей.

Установлено, что изменение концентрации никеля от 0 до 2,9% существенно влияет на основные эксплуатационные характеристики (рис. 2). Наивысшую износостойкость имеет хромомарганцевый чугун без никеля, хотя твердость его ниже легированного никелем. Это можно объяснить тем, что хромомарганцевые чугуны имеют в основном мартенситную структуру. Однако такая структура обладает минимальной пластичностью и быстро разрушается под действием даже незначительных динамических нагрузок. Основа износостойкого чугуна должна содержать в своем составе такие составляющие, как феррит, перлит или аустенит.

Как видно из рисунка, добавки никеля в хромомарганцевый чугун способствуют образованию аустенита и снижению износостойкости. Таким образом, с точки зрения износостойкости белых чугунов никель не может быть использован как легирующий элемент, способный улучшить эту экс-

плуатационную характеристику. Его необходимо вводить в белые чугуны совместно с марганцем и титаном для повышения пластических свойств этих сплавов. Количество никеля необходимо определять для каждой конкретной отливки исходя из условий ее эксплуатации.

Для производства литых деталей багерных насосов содержание никеля в базовом чугуне может быть на уровне 0,3–1,0%. Повышения износостойкости белых чугунов достигают дополнительным микролегированием и модифицированием.

Исследованием влияния сурьмы на свойства чугуна 290X19Г4 в диапазоне ее концентраций 0–1,0% (по присадке) установлено, что небольшие присадки (до 0,15%) способствуют повышению износостойкости чугуна на 15–20% (рис. 3) вследствие ее влияния не только на эвтектическое превращение, но и на кристаллизацию аустенита.

Сурьма сдвигает эвтектическую точку в сторону меньшего содержания углерода, увеличивает количество эвтектики и изменяет ее.

Дальнейшее увеличение присадки сурьмы резко снижает износостойкость чугуна вследствие образования не мелкодисперсной эвтектики, а сплошного поля структурно-свободного цементита (рис. 4), который ослабляет связь с матрицей сплава и легко выкрашивается под действием абразива.

Таким образом, для повышения износостойкости хромомарганцевого чугуна его целесообразно дополнительно микролегировать сурьмой в количестве 0,1–0,15% (по присадке).

Исследовано влияние бора на эксплуатационные характеристики хромомарганцевого чугуна в диапазоне концентраций 0–0,1% (по присадке). Установлено, что дополнительная обработка базово-



Рис. 2. Влияние никеля на твердость и износостойкость чугуна 290X19Г4: 1 – относительная износостойкость; 2 – твердость; 3 – эталон 280X28H2

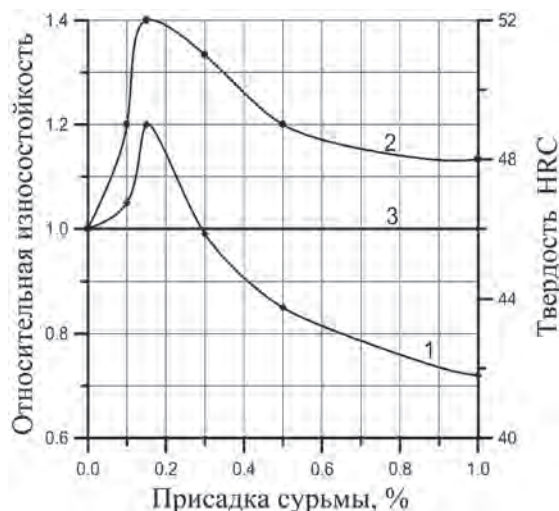


Рис. 3. Изменение твердости и износостойкости базового чугуна 290X19Г4 в зависимости от присадки сурьмы: 1 – относительная износостойкость; 2 – твердость; 3 – эталон 290X19Г4



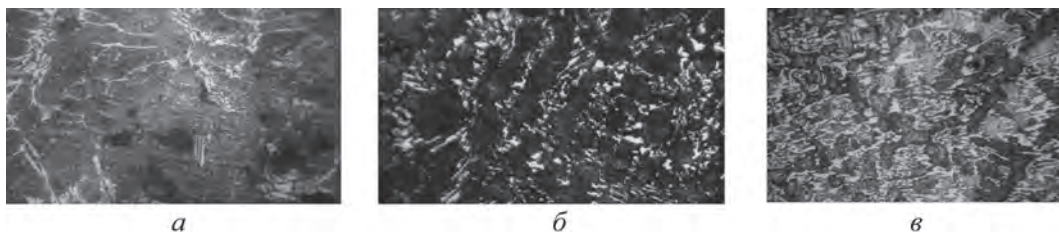


Рис. 4. Изменение структуры хромомарганцевого чугуна 290X19Г4 в зависимости от присадки сурьмы: *а* – без присадки; *б* – 0,15% сурьмы; *в* – 1,0% сурьмы.  $\times 200$

вого чугуна бором существенно улучшает износостойкость и повышает твердость металла (рис. 5).

Бор оказывает сильное влияние на процессы кристаллизации чугуна как поверхностно-активный элемент, измельчает зерно (рис. 6) и осуществляет дополнительное раскисление металла. Бор изменяет и состояние границ зерен, и пограничных слоев, что положительно влияет на свойства чугуна.

Микролегирование чугуна бором повышает его технологические и эксплуатационные свойства и этим снижает содержание в чугуне хрома, марганца, никеля и других элементов.

Однако исследования показали, что к обработке чугуна бором необходимо подходить очень осторожно, поскольку уже при присадке 0,03% чугун приобретает хрупкий излом при комнатной температуре, а его износостойкость практически остается без изменений (см. рис. 5).

Для повышения эксплуатационных характеристик белых чугунов их целесообразно модифицировать бором в пределах 0,005–0,020% (по присадке).

Литейные свойства исследованных чугунов (жидкотекучесть – 500–580 мм; линейная усадка – 1,72–2,20%; объемная усадка – 7,2–7,8%) дают возможность изготавливать отливки любых масс и геометрии с различной толщиной стенок.

Исследования позволили реализовать в качестве материала для изготовления литых деталей, работающих в условиях гидроабразивного износа, базовый хромомарганцевый чугун 290X19Г4 следующего состава: углерод – 2,8–3,2%; хром – 18–20; марганец – 3,8–4,5; кремний – 0,6–0,8%. Предложенный чугун целесообразно дополнительно микролегировать или модифицировать сурьмой,

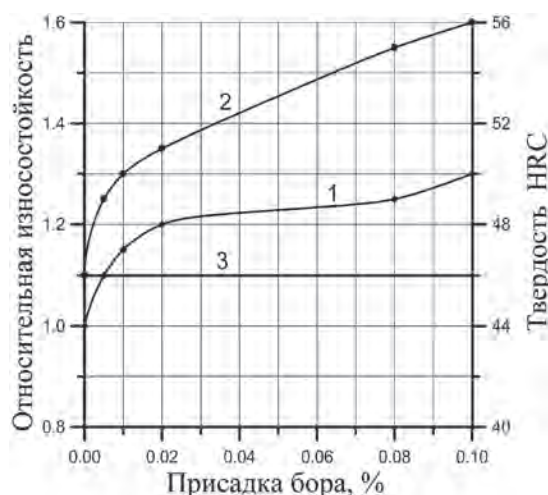


Рис. 5. Износостойкость и твердость хромомарганцевого чугуна 290X19Г4 в зависимости от присадки бора: 1 – относительная износостойкость; 2 – твердость; 3 – эталон 290X19Г4

бором, титаном, РЗМ и другими химическими элементами.

Исследовано влияние титана на характеристики хромомарганцевого чугуна в диапазоне концентраций от 0 до 1,20%. Учитывая сильное сродство титана к кислороду, его вводили в сплав после раскисления жидкого металла алюминием. Известно, что во время кристаллизации сплавов на основе железа, содержащих титан, он выделяется, прежде всего, в виде карбидов или карбонитридов. Титан имеет особенность переохладать расплавленный чугун, что способствует образованию карбидов титана [3].

Повышение концентрации титана до 0,5% способствует увеличению твердости сплава и износостойкости чугуна (рис. 7), что подтверждают исследования структуры такого чугуна (рис. 8).

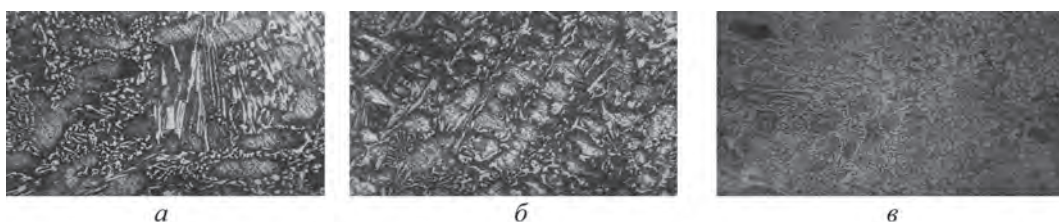


Рис. 6. Структура хромомарганцевого чугуна 290X19Г4 после присадки бора: *а* – без присадки; *б* – 0,04% бора; *в* – 0,1% бора.  $\times 200$

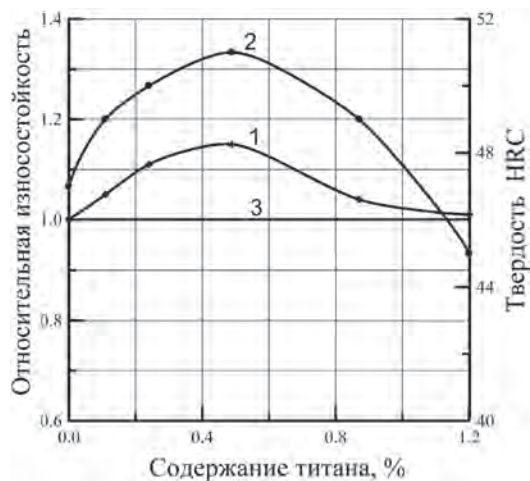


Рис. 7. Износостойкость и твердость хромомарганцевого чугуна 290X19Г4 в зависимости от содержания титана: 1 – относительная износостойкость; 2 – твердость HRC; 3 – эталон 290X19Г4

Последующее увеличение титана в износостойком чугуне уменьшает твердость и износостойкость, хотя она остается лучше, чем сплава 290X19Г4. Следовательно, для улучшения эксплуатационных характеристик хромомарганцевого чугуна его целесообразно микролегировать титаном в пределах 0,1–0,5%.

Редкоземельные металлы (РЗМ) достаточно широко применяют при производстве высокопрочного чугуна, специальных сталей, особенно коррозионноустойчивых, жаропрочных и жаростойких [2]. К сожалению, РЗМ практически не используют при производстве износостойких высокохромистых чугунов (ВХЧ). Это связано с тем, что, с одной стороны, при модифицировании высокохромистых чугунов редкоземельными металлами эффект влияния на их структуру и свойства не такой заметный, как для некоторых групп специальных сталей и высокопрочного чугуна. С другой стороны, данные о влиянии РЗМ на свойства ВХЧ ограничены и часто противоречивые [2, 3]. Нет однозначных рекомендаций относительно количества добавок РЗМ и технологии ввода их в сплав для конкретных марок износостойких хромистых чугунов. Неправильно избранная технология модифицирования высокохромистых чугунов добавками РЗМ может привести к отсутствию эффекта улучшения структуры сплавов или даже ухудшению некоторых свойств.

Влияние РЗМ на эксплуатационные характеристики хромомарганцевого чугуна изучено в диапазоне концентраций 0–0,8% (по присадке). РЗМ в виде лигатуры Мц50Ж3 с содержанием 48% Се, 27% La, 13–15% Nd вводили в тигель печи непосредственно перед выпуском металла. Установлено, что дополнительная обработка хромомарганцевого чугуна присадками РЗМ (до 0,25%) повы-

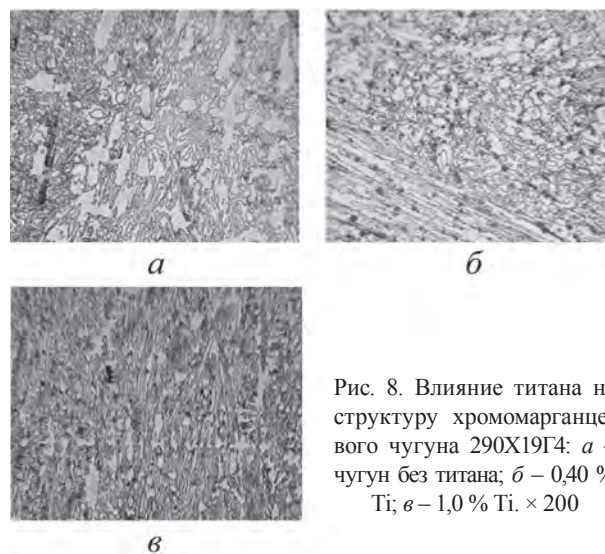


Рис. 8. Влияние титана на структуру хромомарганцевого чугуна 290X19Г4: а – чугун без титана; б – 0,40 % Ti; в – 1,0 % Ti. × 200

шает износостойкость и твердость металла (рис. 9). РЗМ эффективно связывают серу и кислород в ВХЧ, изменяют форму неметаллических включений с игольчатой или продолговатой на глобулярную, которая более упрочняет сплав.

Присадки РЗМ заметно измельчают структуру (рис. 10) исходного ВХЧ. Очевидно, церий и его соединения, образовавшиеся перед началом кристаллизации сплава, располагаются как поверхностно-активные вещества на грани растущих дендритов аустенита и ограничивают их рост. Здесь есть определенная аналогия с влиянием сурьмы. Кроме того, в сплаве, который содержит 0,1% РЗМ, эвтектика  $\gamma + (\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$  имеет более дисперсное строение.

Следовательно, для повышения износостойкости и твердости хромомарганцевого чугуна его целесообразно модифицировать присадками РЗМ в пределах 0,10–0,25%.

Исследованиями макроструктуры установлено, что в образцах, немодифицированных РЗМ, в центральной части есть зона размерами приблизительно 5×15 мм, отвечающая зоне равновесных кристаллов. В модифицированных образцах эта зона практически отсутствует. Присадки в чугун титана совместно с РЗМ заметно измельчают структуру исходного ВХЧ. В центральной части образцов значительно уменьшаются ширина и особенно длина дендритов первичного аустенита.

Титан образует карбиды и карбонитриды, которые расположены в основном в аустенитной матрице и на границах фаз матрица-карбид. В карбидах хрома их значительно меньше. Учитывая соответствие типов кристаллических решеток, они могут выступать центрами кристаллизации аустенита и, таким образом, инокулировать расплав (выступать модификаторами 2-го рода).

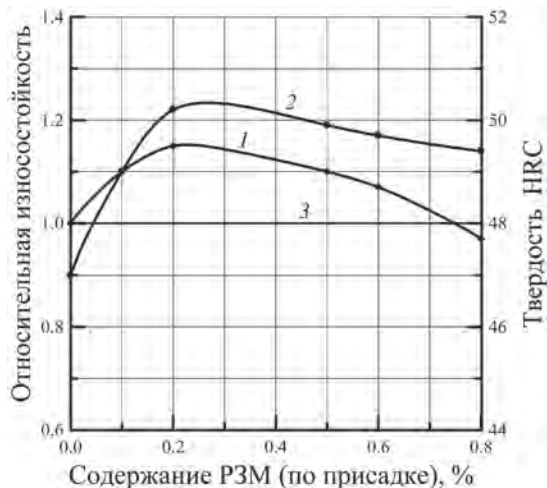


Рис. 9. Изменение износостойкости и твердости хромомарганцевого чугуна 290X19Г4, модифицированного РЗМ: 1 – относительная износостойкость; 2 – твердость; 3 – эталон 290X19Г4

В то же время тугоплавкие частицы TiC или Ti(C, N), которые образовались до кристаллизации основной массы расплава, находясь на границах зерен, могут эффективно противостоять росту фаз, измельчать их и способствовать эффекту модифицирования чугуна. По данным некоторых работ [1, 3], карбиды титана могут выступать зародышами для образования первичных шестигранных карбидов хрома (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> и измельчать их.

#### Выводы

1. Для изготовления литых деталей, работающих в абразивных и гидроабразивных средах, предложен новый износостойкий хромомарганцевый чугун 290X19Г4.
2. Для повышения износостойкости такого чугуна его целесообразно дополнительно микроле-

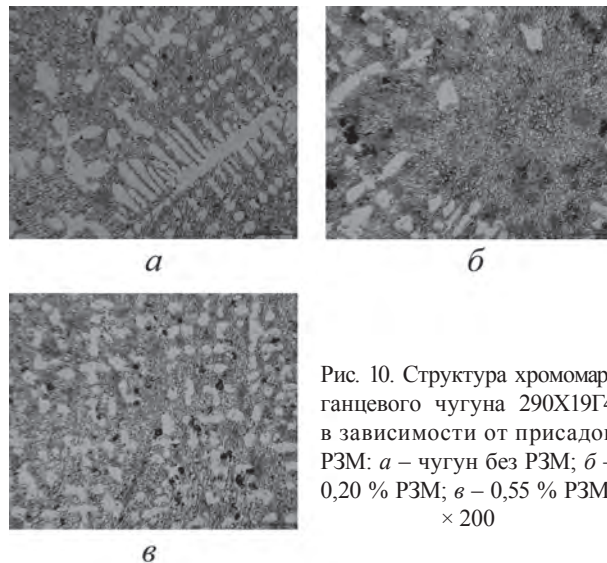


Рис. 10. Структура хромомарганцевого чугуна 290X19Г4 в зависимости от присадок РЗМ: а – чугун без РЗМ; б – 0,20 % РЗМ; в – 0,55 % РЗМ. × 200

гировать сурьмой в количестве 0,1–0,15% (по присадке).

3. Эксплуатационные характеристики чугуна 290X19Г4 можно повысить модифицированием бором в пределах 0,005–0,020% (по присадке).

4. Микролегирование и модифицирование хромомарганцевого чугуна присадками титана и РЗМ существенно влияют на структуру сплава. При этом уменьшаются ширина и длина первичных дендритов аустенита, измельчается эвтектика. Для достижения такой структуры, нейтрализации влияния вредных примесей чугун целесообразно во время выпуска из плавильного агрегата дополнительно обрабатывать присадками титана в количестве 0,15–0,2% и РЗМ – в количестве 0,15–0,25% по присадке.

#### Литература

1. Цыпин И. И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства. М.: Metallurgy, 1983.
2. Гарбер М. Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация. М.: Машиностроение, 2010.
3. Войнов Б. А. Износостойкие сплавы и покрытия. М.: Машиностроение, 1980.