

состоянии ($HRC=55$).

Результаты измерения износостойкости полученного материала в сравнении с другими сталью представлена на рис. 4.

Результаты измерения износостойкости в отожженном состоянии свидетельствуют о том, что введение твердофазных частиц приводит к увеличению износостойкости на 14% по сравнению с неупрочненной сталью. Добавки титана в ковш для увеличения смачиваемости не приводят к повышению износостойкости, так как, очевидно, данной концентрации титана недостаточно для образования достаточного количества карбидов. Исследование влияния термообработки и увеличения твердости на износостойкость показало, что удельная работа износа материала в термообработанном состоянии увеличивается незначительно, несмотря на достаточно большое увеличение твёрдости (в отожженном состоянии $HRC=10$, в закаленном $HRC=55$). Сравнение композиционного материала с другими дорогостоящими высокоизносостойкими сталью (ЭИ 107, 110Х18М-ШД) показало, что полученный композиционный материал по износостойкости им не уступает.

Заключение

Экспериментально, в условиях промышленного производства, осуществлена опытная разливка с введением упрочняющей экзогенной

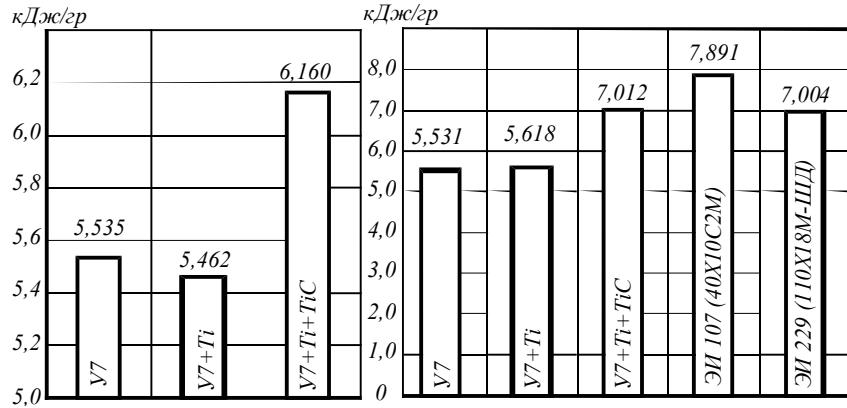


Рис. 4. Удельная работа износа

карбидной фазы и получены цельнолитые заготовки.

При реализации способа упрочнения стали и сплавов дисперсными тугоплавкими фазами распределение дисперсных тугоплавких фаз по сечению слитка остается стабильным во всех исследованных случаях: отмечено некоторое увеличение концентрации дисперсной фазы от края слитка к центру.

Показано, что ввод в жидкую металлическую массу дисперсных твердых тугоплавких фаз при вытягивании слитков вверх позволяет зафиксировать их в металлической матрице и обеспечить увеличение прочностных характеристик металла, существенное увеличение износостойкости металлических материалов и мало влияет на изменение их пластических характеристик по сравнению с базовым материалом.

Библиографический список

- Гольдштейн М.И., Фарбер В.М. Дисперсное упрочнение стали. М.: Металлургия, 1979. 208 с.
- Туманов А.Т. Волокнистые и дисперсно-упрочненные композиционные материалы. М.: Наука, 1976. 156 с.
- Соловьев В.П., Молчанов М.Д., Новоженова В.А. Введение дисперсных частиц в литейные сплавы // Изв. вузов. Черная металлургия. 1981. № 5. С. 136–139.
- Лисиенко В.Г., Лобанов В.И., Китаев Б.И. Теплофизика металлургических процессов. М.: Металлургия, 1982. 240 с.

УДК 621.74.94:669.131.7.061.062

Чайкин В.А., Болдырев Д.А., Чайкина Н.В.

ОСОБЕННОСТИ ГРАФИТИЗИРУЮЩЕГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА СМЕСЕВЫМИ МОДИФИКАТОРАМИ В УСЛОВИЯХ ОАО «АВТОВАЗ»

В ОАО «АВТОВАЗ» производится отливка 2101-3105015 «Ступица переднего колеса» из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧ50. Отливку получают обработкой в

ковше емкостью 1200 кг сфероидизирующим модификатором $NiMg15Ce0,5$ в количестве 4,8 кг (0,4% от металлоемкости ковша). В структуре отливки допускается до 5% цементита. В силу своей

конструктивной особенности вышеуказанная отливка имеет высокую склонность к отбелу. Для исключения этого вида брака используется повышенное количество графитизирующего модификатора. В ковш наряду с никель-магниевой лигатурой дополнительно укладывается графитизирующий модификатор ФС75лб фракции 3,2...10 мм в количестве 11 кг (0,9%). Кроме того, производится позднее модифицирование чугуна. Для этого в литниковую чашу формы укладывается кусок ферросилиция массой 150...200 гр (0,23–0,3% от металлоемкости формы).

С целью снижения себестоимости модификации в данной работе проведено исследование эффективности смесевых модификаторов МК21 в ковше и МКМг19 в форме, производимых Смоленским региональным отделением российской ассоциации литьщиков (СРО РАЛ), по ТУ 0826-003-47647304-2001.

До недавнего времени производство смесевых модификаторов, в основном, было основано на использовании вторичных продуктов (иногда отходов) ферросплавных предприятий. В новой генерации смесевых модификаторов применяются более перспективные материалы. Речь идет о модификаторах на основе дисперсных порошков, свойства которых до конца еще не раскрыты и изучаются сейчас с возрастающей активностью.

Модификаторы серии МК – пакетированные смеси, состоящие, в основном, из порошков активированного высокотемпературной обработкой углерода и полученного физико-химическим путем металлического кремния. Кроме того, модификаторы в микродозах содержат в своем составе кальций, медь, алюминий и титан. В МКМг19 дополнительно вводятся сублимирующие при температурах заливки химические соединения магния. Пары магния резко увеличивают турбулентность потока, способствуют улучшению теплообмена между частицами модификатора и расплавом

и, следовательно, обеспечивают растворимость частиц модификатора во время заполнения формы. Высокая степень дисперсности и специальные свойства, приобретаемые веществом при переходе в ультратонкое состояние, обусловливают резкое увеличение модифицирующей способности и "живучести" смеси.

Для обоснования преимуществ предлагаемой смеси следует рассмотреть механизм модификации чугуна. При введении ферросилиция в струю металла турбулентность потока при заполнении ковша равномерно распределяет присадку по объему металла. Вокруг растворяющихся частиц ферросилиция возникает значительная химическая неоднородность [1], высокое содержание кремния. Кремний по своему гомологическому электронному строению является аналогом углерода: он служит сильным донором валентных электронов по отношению к дефектной 3d-оболочке железа. Однако у кремния валентные электроны более удалены от ядра, чем у углерода, и сильнее экранированы от него остовыми электронами. Поэтому в борьбе металлоидов углерода и кремния за химические связи с металлом железом побеждает кремний. Вокруг атомов кремния, растворенных в жидком или твердом железе по типу растворов замещения, образуется «углеродный вакуум». Это увеличивает скученность атомов углерода в оставшемся пространстве, что является центрами зарождения эвтектики. Таким образом, в нашем случае кремний смещает точку эвтектического превращения влево и способствует дополнительному выделению графитной фазы [2]. Расчеты показывают, что количество частиц ФС 75 в одном см³ чугуна составят 0,68 шт./см³. Это явно недостаточно, процесс образования графитовой фазы протекает в течение сравнительно короткого времени, равного времени существования пересыщенных по кремнию зон в расплаве жидкого чугуна. Поэтому для данной отливки необходимо дополнительное позднее модифицирование.

В работе [3] теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что для достижения в отливке мелкодисперсной эвтектической структуры необходимо иметь в расплаве не менее 10⁶–10⁸ шт./см³ центров кристаллизации. Расчеты показывают, что именно такое количество частиц модификатора могут вносить модификаторы типа МК.

Качественные показатели чугуна

Номер формы	Микроструктура		HB _{5/750/10}	σ_b , МПа	δ , %
	Форма, распределение и размеры графитовых включений	Металлическая основа			
1	ШГф 3, ШГд90, ШГ2, ШГр2	Ледебурит	321–341	—	—
2	ШГф5, ШГд15, Шг12, ШГр2	П70, (Фе30), Ц10	255–269	680	3,5
3	ШГф5, ШГд15, Шг12, ШГр2	П55, (Фе45), Ц0	223–229	790	8,8
4	ШГф5, ШГд15, Шг12, ШГр2	П55, (Фе45), Ц0	217	740	10
5	ШГф5, ШГд15, Шг12, ШГр2	П55, (Фе45), Ц0	217	745	9,7
Требования по нормали FIAT-BA3 52215	Графит шаровидный, ССГ не менее 80%	Металлическая основа – ферритно-перлитная, цементит до 5%	170...229		

Таким образом, в чугун вводится большое количество дисперсных частиц графита и кремния, создающих идеальные условия для зарождения графитной фазы, так как частицы модификатора соизмеримы с фрактальными агрегатами графита [4]. Основной признак фрактальности структуры – ее способность сохранять самоподобие в процессе эволюции в различных пространственно-временных масштабах [5]. С точки зрения диссипативных и фрактальных структур жидкий чугун находится в пространственно однородном состоянии с довольно высокой степенью симметрии. Как только начинается процесс переохлаждения, происходит обильный обмен энергией и веществом с окружающей средой, появляется избыток свободной энергии, симметрия системы нарушается и возникает диссипативная структура с более низкой степенью симметрии. Диссипативная структура, достигая в процессе эволюции системы порога неустойчивости, начинает самоорганизацию новой, более устойчивой на данном иерархическом уровне структуры. Система стремится к приобретению нового симметричного состояния и идет по пути создания фрактальной структуры. Этот момент важен, поскольку возможность получения заданной структуры наиболее высока. При формировании иерархической структуры должны иметь место управляющие параметры, которые в общем случае могут быть различными и для различных иерархических уровней. Для поликристаллического материала, в котором присутствуют различные химические элементы, могут развиваться два сценария формирования структуры: при сравнимом количестве химических элементов различных групп управляющим параметром будут служить диффузионные затруднения; когда же содержание одних химических элементов будет давляющее большими, управляющим параметром будет служить фрактальная размерность, которая и будет определять захват пространства [6].

В нашем случае, в расплав вносится множество дисперсных частиц углерода и кремния, а при модифицировании в форме и магния, что будет спо-

собствовать формированию мелкозернистой структуры серого чугуна без наличия свободного цементита. Таким образом, искусственно создается благоприятная структурная наследственность в кристаллизующемся сплаве.

Это не противоречит и термодинамике процесса. Баланс объемной и поверхностной составляющих при гетерогенном зарождении твердой фазы показывает, что общее изменение энергии ΔG_n для образования частицы критического размера на подложке меньше гомогенного ΔG на величину $f(\alpha)$, зависящую от равновесного контактного угла α .

$$\Delta G_n = \Delta G \cdot f(\alpha), \quad (1)$$

где

$$f(\alpha) = [(2 + \cos\alpha) \cdot (1 - \cos\alpha)^2] : 4, \quad (2)$$

тогда

$$\cos\alpha = (\sigma_{n-p} - \sigma_{r-p}) : \sigma_{r-p}, \quad (3)$$

где σ_{n-p} , σ_{r-p} , σ_{r-p} – удельные поверхностные энергии на границах: «графит–расплав», «графит–подложка» и «подложка–расплав».

Если в качестве подложки будет использоваться графит, то величину σ_{r-p} можно выразить формулой

$$\sigma_{r-p} \rightarrow 2 \sigma_{r-p} \sin(\beta/2),$$

где β – угол границ, стыкующихся в поликристаллическом однородном теле.

Анализ приведенных уравнений показывает, что кристаллизация графита на углеродсодержащих включениях будет осуществляться при минимальных переохлаждениях. При этом свободная энергия образования гетерогенного зародыша намного меньше, чем гомогенного, вследст-

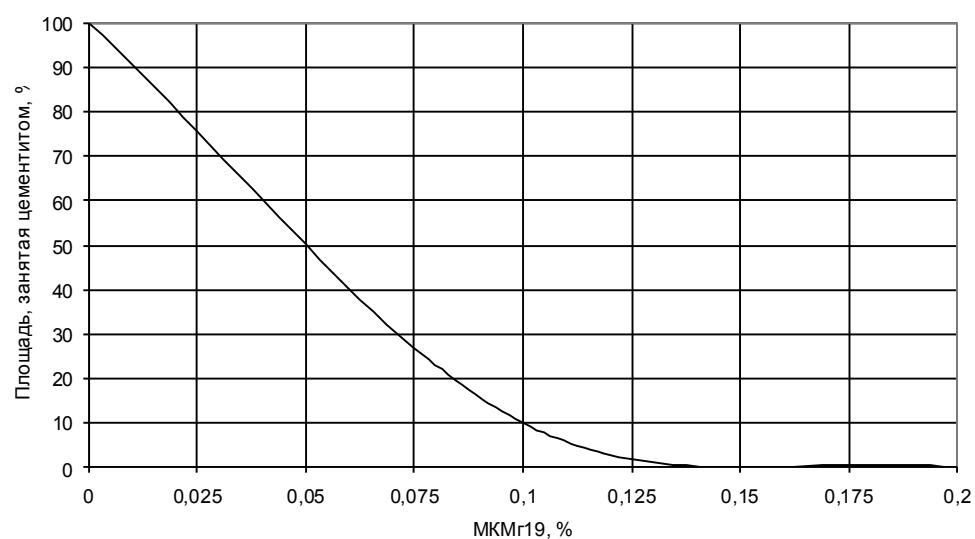


Рис. 1. Количество цементита в структуре чугуна (%) в зависимости от расхода МКМг19 (%)

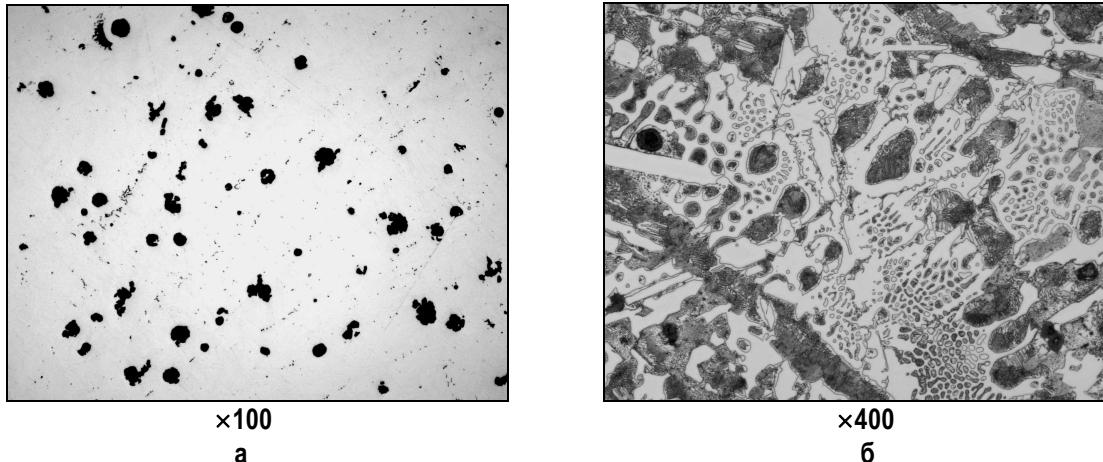


Рис. 2. Микроструктура не модифицированного в форме чугуна:
а – не травлено: ШГф 3, ШГд90, ШГ2, ШГр2; б – травлено: ледебурит 100%

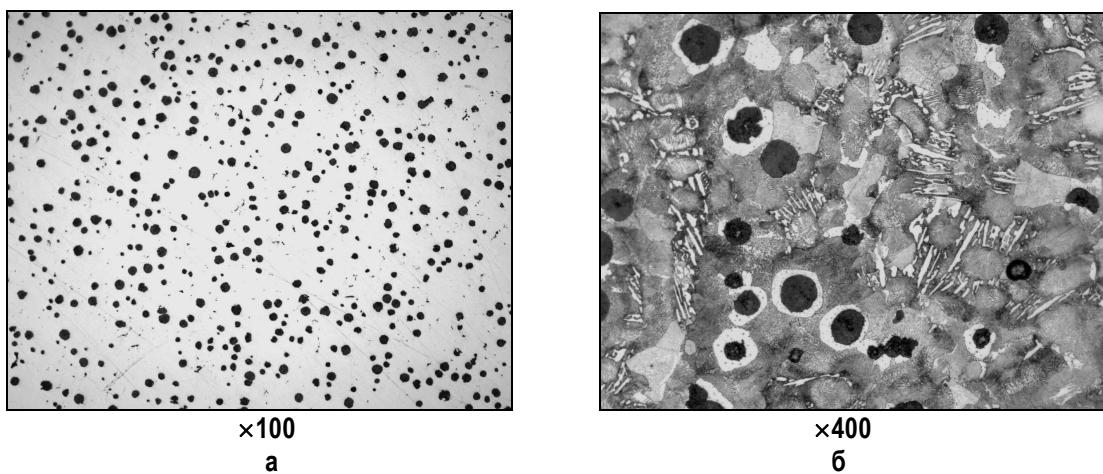


Рис. 3. Микроструктура чугуна модифицированного в форме 0,1% МКМг19:
а – не травлено: ШГф5, ШГд15, Шг12, ШГр2; б – травлено: П70, (Фе30), Ц10

вие чего переохлаждение при кристаллизации металлов в первом случае существенно (в много раз) меньше, чем во втором.

Зародышеобразующую эффективность НМВ можно оценить по трем основным критериям [7]:

1) по правилу Данкова-Конобеевского: межфазное поверхностное натяжение минимально, если кристаллические решетки двух контактирующих фаз идентичны, а по кристаллографическим параметрам отличаются не более чем на 15%;

2) по формуле Бачинского: межфазная поверхностная энергия минимальна, если разность плотностей двух контактирующих фаз минимальна;

3) по однотипности (родственности) связей между атомами каждой из фаз: межфазное поверхностное натяжение минимально, если между фазами есть взаимодействие.

Все эти три правила идеально выполняются, если в качестве подложки будет сам графит. Кремний и магний также способствуют дополнитель-

льному зарождению центров кристаллизации.

Следует отметить также, что с уменьшением размера частиц гравитационные силы все слабее контролируют кинетику системы «металл–частица», частицы совершают броуновское движение, и коэффициент их диффузионной подвижности увеличивается. Следовательно, они обладают высокой седиментационной устойчивостью. Возрастает также их термодинамическая устойчивость против растворения вследствие снижения поверхностного натяжения и повышения активности подложек. Вся открытая поверхность последних покрыта активированными атомами, защищающими частицу от контакта с расплавом и растворения [14]. Все это резко увеличивает живучесть модификатора.

Учитывая вышесказанное, предлагаемые модификаторы помогают эффективно устранять проблему отбела в отливках. Они должны обладать высокой живучестью, а количество их для снятия

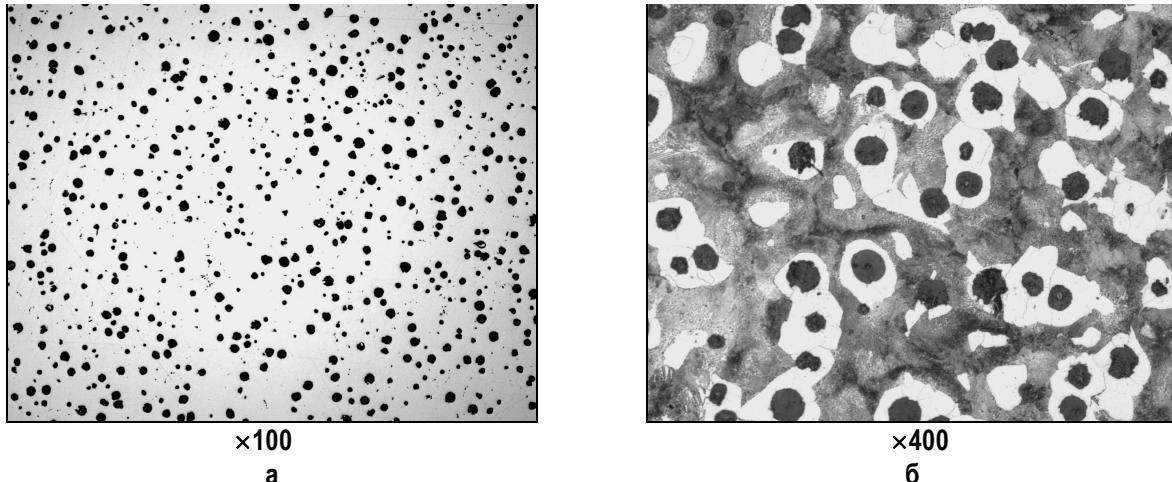


Рис. 4. Микроструктура чугуна модифицированного в форме 0,15% МКМг19:
а – не травлено: ШГф5, ШГд15, Шг12, ШГр2; б – травлено: П55, (Фе45), Ц0

отбела может быть существенно уменьшено, по сравнению с традиционными модификаторами.

При проведении экспериментов определили оптимальное количество модификатора МКМг19 для внутриформенного модифицирования высокопрочного чугуна на отливке 12101-3103015 «Ступица переднего колеса» из высокопрочного чугуна марки ВЧ 50. Чугун состава: С=3,60%, Si=1,97%, Mn=0,42%, P=0,019%, S=0,007%, Cr=0,045%, Ni=0,58%, Cu=0,28%, Sn=0,015% модифицировали в ковше никель-магниевой лигатурой и модификатором МК 21 в количестве 3 кг (0,25%) при температуре расплава 1490°C. Такое количество МК 21 является оптимальным для ковшевого модифицирования высокопрочного чугуна.

Температура начала разливки металла составила 1460°C при нормативе 1440...1460°C. Из ковша были залиты 5 форм (40 отливок) сразу после замера температуры. Первая форма заливалась без добавок, в стояк второй формы засыпали 65 г смесевого модификатора МКМг19, что составило 0,1% от металлоёмкости формы, в стояк третьей и четвертой форм поместили 100 и 130 г МКМг19 соответственно (0,15 и 0,2% от металлоёмкости формы) и, наконец, в пятую форму поместили кусок ферросилиция ФС75л6 массой 200 грамм (0,3%) от металлоёмкости формы.

Отливки с каждой из форм анализировались на наличие отбела, изучалась микроструктура отливок. Из тела каждой заготовки вырезались образцы для изготовления проб для проведения механических испытаний. Результаты испытаний приведены в **таблице**, наглядно представлены на **рис. 1**. Микроструктура отливок показана на **рис. 2–4**.

Как видно из результатов экспериментов, графитизирующее модифицирование чугуна в ковше

модификатором МК 21 не устраивает отбел в отливках из-за их конструктивных особенностей. Вместе с тем, добавка в стояк только 0,1% МКМг19 обеспечивает соответствие предела прочности и относительного удлинения чугуна требованиям ГОСТ. При этом резко снижается количество цементита в отливках. Однако его содержание, все же, превышает допустимое значение, в результате чего оказывается завышенной и твердость. Оптимальной добавкой модификатора следует считать 0,15% МКМг. В данном случае отбел в отливках устраняется полностью и обеспечивается требуемый комплекс механических свойств.

Обработка расплава в ковше модификатором МК21 в количестве 0,25% в ковше и 0,3% 9 кг/т в литниковой чаше также исключает отбел в отливках.

Таким образом, подтверждаются теоретические предпосылки об эффективности дисперсных смесевых модификаторов и уменьшении их требуемого количества.

Ожидаемый экономический эффект от замены модификаторов составит:

$$\mathcal{E} = C_1 - C_2 = K_1 \Pi_1 - K_2 \Pi_2,$$

где C_1, C_2 – себестоимость модифицирования по существующей и предлагаемой технологии соответственно; K_1, K_2 – количество модификатора до и после внедрения, $K_1 = 9$ кг/т ФС75л6 в ковш +3 кг/т в литниковую чашу, $K_2 = 2,5$ кг/т МК21 в ковш + 1,5 кг/т МКМг19 в стояк; Π_1, Π_2 – цены модификаторов, ФС75л6 – 38 руб./кг, МК21 – 25,500 руб./кг, МКМг19 – 52,500 руб./кг.

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= (9 + 3) \times 38 - (2,5 \times 25,5 + 1,5 \times 52,5) = \\ &= 313,5 \text{ руб./т жидкого.} \end{aligned}$$

Библиографический список

1. Леках С. Н., Бестужев Н. И. Внепечная обработка высококачественных чугунов в машиностроении. Мн.: Наука и техника, 1992. 269 с.
 2. Чугун: Справочник / Под ред. А.Д. Шермана, А.А. Жукова. М.: Металлургия, 1991. 576 с.
 3. Калинин В. Т. Научные основы прогрессивных технологий модифицирования и легирования чугунов для отливок металлургического оборудования: Автoref. ... д-ра техн. наук. Днепропетровск, 1991. 17 с.
 4. Давыдов С. В. Новый подход к классификации методов модифицирования // Металлургия машиностроения. 2006. № 5. С. 5–9.
 5. Иванова В. С., Новиков В. У. К итогам симпозиума «Фракталы и прикладная синергетика» // Металлургия машиностроения. 2004. № 1. С. 33–37.
 6. Закирничная М. М. Образование фуллеренов в углеродистых стальях и чугунах при кристаллизации и термических воздействиях: Дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 2001.
 7. Стеценко В.Ю., Маркович Е.И. О зароды шеобразовании при затвердевании металлов // Металлургия машиностроения. 2007. № 1. С. 32–37.
 8. Гаврилин И.В. Кластеры – фуллерены – фракталы в жидких литейных сплавах // Металлургия машиностроения. 2004. № 5. С. 30–33.
-