

Таким образом, индукционную печь средней частоты можно рассматривать как универсальный плавильный агрегат, позволяющий получать отливки высокого качества с минимальными затратами.

Список литературы

1. **Эффективность современных способов** повышения качества изделий из чугуна и развитие металлургических и машиностроительных предприятий в условиях конкуренции / Д.А.Лубяной, Б.А.Кустов, Н.И.Новиков и др.; Под ред. к.т.н. Лубяной Д.А. и к.э.н. Новикова Н.И. – Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2004.–131 с.
2. **Лубяной Д.А., Нейгебауэр Г.О., Цымбал В.П., Дробышев А.Н.** Поведение азота при плавке чугуна в индукционных печах с кислой футеровкой // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1991.– №2. – с.76–80.
3. **А.с. 1636448** / Чичков В.И., Попов Н.А., Болдов В.П., Лубяной Д.А. и др. Способ получения синтетического модифицированного чугуна в индукционной печи промышленной частоты.
4. **Чичков В.И., Лубяной Д.А., Самсонов Ю.Н. и др.** Результаты внедрения ресурсосберегающей технологии в литейном цехе ОАО «ЗСМК» // Литейщик России. – 2004.– №7. – с.27–29.
5. **Кустов Б.А., Чичков В.И., Жарикова Н.Н., Лубяной Д.А. и др.** Повышение стойкости поддонов из чугуна индукционной плавки // Сталь. – 1989. – №6. – с.28–30.
6. **Цепелев В.С., Селянин И.Ф., Лубяной Д.А. и др.** Термовременная обработка расплава чугуна // Сталь. – 1995. – №5. – с.42–45.
7. **Лубяной Д.А., Чичков В.И., Самсонов Ю.Н., Старченко В.Г. и др.** Внедрение термовременной обработки на металлургических и машиностроительных предприятиях Кузбасса. – Труды VII съезда литейщиков России.– Т1. – Новосибирск. – 2005. – С.89–92.
8. **Индукционные печи для плавки чугуна.** – М.: Машиностроение, 1976.– 176 с.
9. **Пат. 2108396 РФ** / Лубяной Д.А., Соловьев С.А., Яппаров Р.Т., Старченко В.Г. // Способ десульфурации в индукционных печах с кислой футеровкой.
10. **Софрошенков А.Ф., Лубяной Д.А., Синявский И.А.** Внедрение ресурсосберегающих технологий производства термостойкого чугуна // Изв. вузов. Черная металлургия. 2005. – №6. – с. 45–47.
11. **Дробышев А.Н., Лубяной Д.А., Самсонов Ю.Н. и др.** Использование устройства контроля окисленности для экспрессного определения содержания кремния в чугуне индукционной и доменной плавки // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1996. – №4. – с.41–42.
12. **Шульгин Ю.Ф., Лубяной Д.А., Бондарев А.А. и др.** Технология производства высокопрочного чугуна с термовременной обработкой и использованием различных модификаторов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2001. №10. – с.52–54.
13. **Лубяной Д.А., Дробышев А.Н., Селянин И.Ф.** Влияние температуры расплава чугуна для прокатных валков на глубину их отбела и твердость // Изв. вузов. Черная металлургия. 2002.– №6. –с.50.
14. **Волощенко М.В., Суменкова В.В., Олейник В.Н.** Предварительная десульфурация расплава при получении высокопрочного чугуна // Литейное производство. – 1977. – №6. – с.7–8.
15. **Лубяной Д.А.** Анализ механизма и кинетики десульфурации чугуна в кислых индукционных печах промышленной и средней частоты // Литейщик России. – 2006. – №12. – с. 22–25.
16. **Ладыженский Б.Н., Тунков В.П.** Выплавка стали в машиностроении. – М.: Металлургия, 1968.
17. **Ладыженский Б.Н.** Применение порошкообразных материалов в сталеплавильном процессе. – М.: Металлургия, 1973. – с.312.
18. **Траузеделъ Д., Шлюкебер Д., Донбах Ф.** Реализация специальных технологических и металлургических задач в индукционных печах средней частоты // Литейщик России.– 2003. – №5. – с. 20–23.
19. **Лузгин В.И., Петров А.Ю., Рачков С.А. и др.** Индукционные плавильные установки с широкими технологическими возможностями получения сплавов черных и цветных металлов // Литейщик России. – 2006. – №10. – с. 24–27.

Д. А. Болдырев (Исследовательский центр ОАО «АВТОВАЗ», г. Тольятти),
А.В.Чайкин (МГТУ им. Баумана, Москва)

Новые смесевые модификаторы для инокулирующей обработки чугунов

В работе [1] отмечено, что кремний образует более сильные связи с железом, чем углерод, способствуя снижению энергетического барьера и усиливая графитизацию. Выделяемый из ферросилиция кремний, концентрируясь вблизи образовавшихся включений графита, также ускоряет диффузию углерода к растущему сферокристаллу графита из окружающей его аустенитной оболочки [2].

Одна из основных причин высокого модифицирующего действия малых (десятые и сотые доли процента) концентраций Si при наличии в десятки раз больших концентраций кремния в исходном жидком чугуне связана с возникновением локальной химической и тепловой неоднородности при растворении модификатора в расплаве. Частицы ферросилиция растворяются в чугуне полностью, и тем быстрее, чем они мельче. Вокруг растворяющихся частиц ферросилиция воз-

никают сильно обогащенные кремнием зоны (микроскопические местные объемы), своего рода «следы» растворенных частиц, размером до нескольких миллиметров. Углерод из таких объемов вытесняется кремнием в области, где кремния меньше. В результате в расплаве появляются области с повышенным содержанием углерода, в которых при кристаллизации образуются графитные включения. Поскольку кремний повышает активность углерода, то расплав в этих зонах становится сильно заэвтектическим и его фигуративная точка в координатах «температура – концентрация» далеко входит в двухфазную зону, в которой выделяется первичный графит. Возникающая в расплаве вокруг частиц холодного модификатора тепловая неоднородность только ускоряет данный переход [3]. Существование в расплаве объемов с разным химическим составом – явление временное, исчезающее

за счет диффузии и перемешивания расплава конвекционными потоками. Именно поэтому графитизирующая способность ферросилиция сильно убывает с течением времени (в пределах 10–20 мин) [4].

При кристаллизации чугуна углерод выделяется из жидкости в виде графита, и его скопления служат потенциальными зародышами графита. Зародыши, благодаря высокой поверхностной энергии, не растворяются в жидком металле [5] и повышают температуру эвтектического превращения сплава. Продолжительность графитизирующего модифицирования зависит от времени существования скоплений углерода, подверженных тепловому разупрочнению. По мере гомогенизации сплава при его выдержке в жидком состоянии инокулирующий эффект исчезает.

Принимая во внимание вышеизложенные механизмы влияния углерода и кремния на процесс графитообразования в чугуне, а также особенности влияния каждого элемента, наиболее удачным решением, учитывающим преимущества этих элементов, является использование смесевых модификаторов.

В настоящее время смесевые модификаторы получили второе рождение. На этапе создания и начала использования смесевых модификаторов их производство было основано большей частью на использовании вторичных продуктов (иногда отходов) ферросплавных предприятий. На современном этапе, характеризующемся новым подходом к теории и практике использования смесевых модификаторов, для их изготовления применяются новейшие материалы. В термин «новейшие материалы» вкладывается смысл применения новых способов получения известных веществ. Так, смесевые модификаторы нового поколения – это пакетированные смеси, основой которых являются порошки активированного высокотемпературной обработкой углерода (графита) и полученного физико-химическим путем кристаллического кремния. В качестве дополнительных составляющих в смесевых модификаторах присутствуют в микродозах кальций, медь, алюминий, РЗМ, железо. Главная особенность комплексных смесевых модификаторов (МК) заключается в том, что их часть находится в высокодисперсном состоянии, обуславливающим резкое повышение модифицирующей способности и «живучести» смеси.

Механизм работы смесевых модификаторов заключается в создании идеальных условий для зарождения графитной фазы при соизмеримости частиц модификатора с кластерами графита [6] при введении в чугун большого количества дисперсных частиц графита и кремния.

Таким образом, для применения смесевых модификаторов в производственных условиях необходимо определить соотношение углерода и кремния в общем составе, учитывая все параметры технологического процесса: состав шихты, типы плавильных агрегатов и последовательность их работы, температуру чугуна в печи и др. Например, зная о более сильном по сравнению с углеродом влиянии кремния на процесс графитообразования, укрупно можно предположить, что для ваграночного чугуна содержание графита в смеси должно преобладать над кремнием, а для электропечного чугуна – наоборот.

Для проверки выдвинутого предположения были

проведены опытные заливки деталей «Вал коленчатый» из ВЧШГ марки Gh75–50–03 и «Блок цилиндров» из СЧ марки Gh190В. Плавка велась по дуплекс-процессу: 40-тонная электродуговая печь + 20-тонная индукционная печь ожидания.

При проведении эксперимента на отливках коленчатых валов совместно со сфероидизирующей обработкой Ni–Mg–Ce-лигатурой (5,4 кг на 1200 кг расплава чугуна) по действующему технологическому процессу, первичная графитизирующая обработка проводилась в 1,2-тонном ковше навеской модификатора МК21, с соотношением углерода и кремния 2/1. Было проведено 2 эксперимента: 1 – с вводом 1 кг модификатора МК21; 2 – с вводом 2 кг модификатора МК21 на ковш. Вторичное модифицирование в первом случае осуществлялось по действующей технологии куском ферросилиция ФС75л3 массой 150–200 г в заливочной чаше формы и различными навесками модификатора МККа21 (МК21 с 5% кальция). На исследование микроструктуры и механических свойств предоставлялись по 2 отливки с каждой формы: в литом и нормализованном состояниях. Нормализацию проводили в проходной газовой печи по ступенчатому режиму: нагрев отливок в печи до температуры 750°C, выдержка 40 мин, нагрев до температуры 910°C, выдержка 1 ч 40 мин, охлаждение на воздухе в течение 2-х часов.

В первом эксперименте из металла, обработанного 1 кг модификатора МК21, после 6,5 минут выдержки, для моделирования ослабления модифицирующего эффекта, были залиты 3 формы отливок «Вал коленчатый» 2103–1005020 с вторичным модифицированием: 1–1: 50 г МККа21 в стояк + кусок ФС75л3 в чашу, 2–1: 25 г МККа21 в стояк + кусок ФС75л3 в чашу и 3–1: кусок ФС75л3 в чашу.

Во втором эксперименте из ковша, обработанного 2 кг модификатора МК21, после 6,5 минут выдержки, также для моделирования ослабления модифицирующего эффекта, была залита 1 форма отливок «Вал коленчатый» 2110–1005020 с вторичным модифицированием куском ФС75л3 в чашу (1–2).

Механические свойства и описание микроструктуры материала отливок «Вал коленчатый», модифицированных МК21, представлены в таблицах 1–3 и на рис. 1–7.

По результатам экспериментов можно отметить, что добавка модификатора МККа21 в форму в количестве 0,05 и 0,025% и без него одновременно с размещением куска ФС75л3 в заливочной чаше формы не оказала дополнительного влияния на эффект от позднего графитизирующего модифицирования. Следовательно, ввод модификатора МККа21 в форму для деталей, не имеющих кромочного отбела, не требуется.

Литая микроструктура отливок имеет до 1% цемента по границам зерен, то есть навеска модификатора МК21 массой 1 и 2 кг при обработке металла в ковше емкостью 1200 кг не обеспечивает необходимый модифицирующий эффект.

Микроструктура отливок после нормализации имеет до 3% вторичного цемента по границам зерен в отливках коленчатых валах 2103 и до 5% – в отливках коленчатых валов 2110. Данное явление, видимо, объясняется недостатком общего содержания

Таблица 1. Твердость отливок коленчатых валов в литом и нормализованном состоянии

№ п/п	HB5/750/10 в литом состоянии		HB5/750/10 после нормализации	
	хвостовик	фланец	хвостовик	фланец
1-1	255	255	269-278	269-278
2-1	255	285	269	285-302
3-1	255	269	269-288	269
1-2	255-269	229	285	255-269
НТД (нормаль 52215)	Не оговариваются		250-302	

Таблица 2. Временное сопротивление на разрыв и относительное удлинение материала коленчатых валов в литом и нормализованном состоянии

№ п/п	В литом состоянии		После нормализации	
	σ_b , кгс/мм ²	δ , %	σ_b , кгс/мм ²	δ , %
1-1	80	8,0	89	8,0
2-1	80	8,0	86	5,2
3-1	82	8,8	85	6,0
1-2	80	8,0	89	8,0
НТД (нормаль FIAT-BA3 52215) (после нормализации)	Не регламентируется		Не более 75	Не более 3

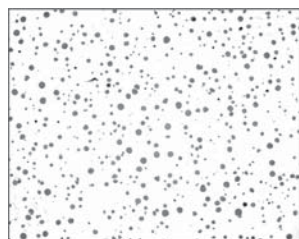


Рис. 1. Графит в микроструктуре отливок «Коленвал», модифицированных МК21, x100

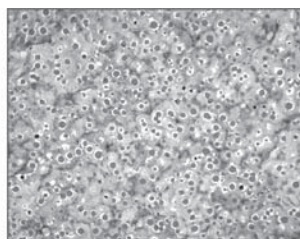


Рис. 2. Микроструктура в литом состоянии (хвостовик), x100

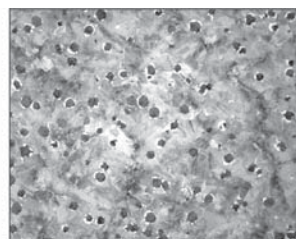


Рис. 3. Микроструктура в литом состоянии (фланец), x100

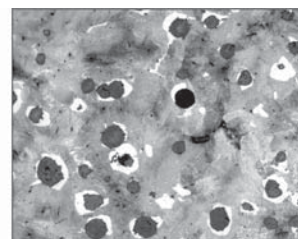


Рис. 4. Микроструктура в литом состоянии (фланец), x400

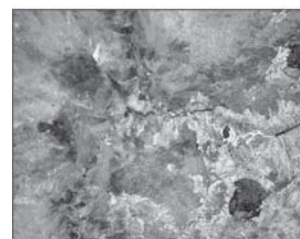


Рис. 5. Микроструктура в литом состоянии (фланец), x500 (вторичный цементит по границам зерен)

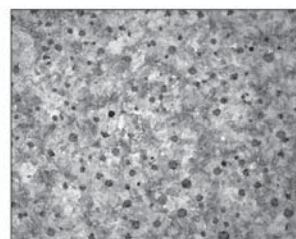


Рис. 6. Микроструктура после термообработки нормализации (хвостовик), x100

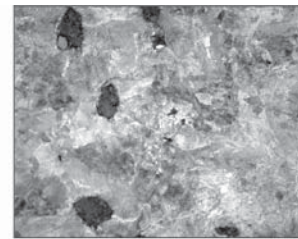


Рис. 7. Микроструктура после термообработки нормализации (фланец), x500 (вторичный цементит по границам зерен)

кремния в химическом составе чугуна из-за его малого содержания в модификаторе. То есть, имеющийся мелкодисперсный графит, образующий кластерные зародыши графитных включений в чугуне, оказывает определенное влияние только на формирование структуры чугуна из жидкого состояния и не влияет на его структуру после термообработки (нормализации).

При проведении эксперимента на отливках блоков цилиндров в ковш емкостью 1200 кг для проведения графитизирующего модифицирования был введен модификатор МК21 в количестве 3 кг, а для мик-

ролегирувания – 800 г Sn.

Величина отбела по клиновой пробе – 4,7 мм при нормативе 2,0-2,6 мм. Из опытного ковша были залиты 2 формы (4 отливки): 1-я форма – сразу после замера температуры, а 2-я форма – через 6 минут с момента замера температуры (норматив – до 6 минут).

Таблица 3. Описание микроструктуры материала коленчатых валов в литом и нормализованном состояниях

№ п/п	Микроструктура по нормали FIAT-BA3 52215	
	в литом состоянии	после нормализации
1-1	Хвостовик:	
	Графит шаровидный типа OA, OB № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 15%	Графит шаровидный типа OA, OB № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 10%
	Фланец:	
	Графит шаровидный типа OA, OB № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 10%, отдельные пластинки цементита по границам зерен	Графит шаровидный типа OA, OB № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита 1-2%, включения вторичного цементита по границам зерен 2-3%
2-1	Хвостовик:	
	Графит шаровидный типа OA, OB, № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 20%	Графит шаровидный типа OA, OB № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита 1-2%, включения вторичного цементита по границам зерен 2-3%
	Фланец:	
	Графит шаровидный типа OA, OB, № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 8%, отдельные пластинки цементита по границам зерен	Графит шаровидный типа OA, OB, № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 1%, включения вторичного цементита по границам зерен 2-3%
3-1	Хвостовик:	
	Графит шаровидный типа OA, OB, № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 15%	Графит шаровидный типа OA, OB, № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 1%, включения вторичного цементита по границам зерен 2-3%
	Фланец:	
	Графит шаровидный типа OA, OB, № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 10%, отдельные пластинки цементита по границам зерен	Графит шаровидный типа OA, OB, № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 1%, включения вторичного цементита по границам зерен 2-3%
1-2	Хвостовик:	
	Графит шаровидный типа OA, OB, № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 15%	Графит шаровидный типа OA, OB, № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 5%
	Фланец:	
	Графит шаровидный типа OA, OB, № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 10%, отдельные пластинки цементита по границам зерен	Графит шаровидный типа OA, OB, № 6; степень сфероидизации графита – 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита 1-2%, включения вторичного цементита по границам зерен до 5%
для марки Gh 75-50-03	Не оговаривается	
	Графит шаровидный OA, OB; степень сфероидизации не менее 90%; металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита – до 8%; допускаются следы цементита – не более 1%	

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48

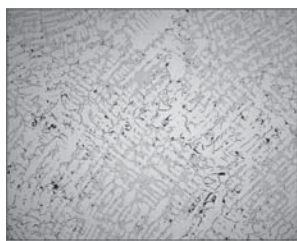


Рис. 8. Графит пластинчатый в микроструктуре отливок «Блок цилиндров», модифицированных МК21, x100

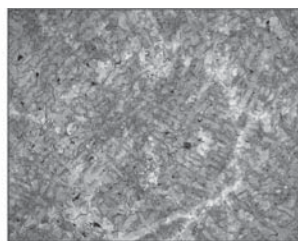


Рис. 9. Микроструктура – перлит пластинчатый, феррита до 5%, x100

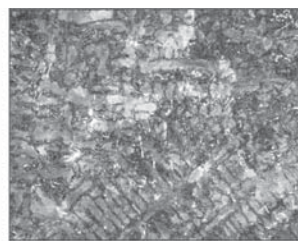


Рис. 10. Микроструктура – перлит пластинчатый, феррита до 5%, цементит, x200

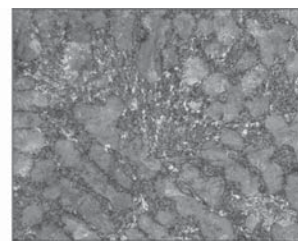


Рис. 11. Микроструктура – перлит пластинчатый, феррита до 5%, x400

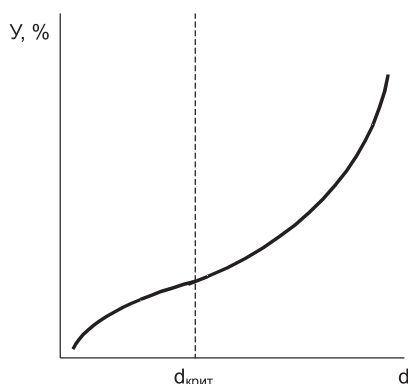


Рис. 12. Модель зависимости «усвояемость модификатора – размер фракции», где U – усвояемость модификатора, %; d – размер фракции модификатора; $d_{\text{крит}}$ – критический размер фракции модификатора

Твердость по Бринеллю материала отливок «Блок цилиндров» – 229 НВ. Характеристика микроструктуры: металлическая основа – пластинчатый перлит, феррита до 5%, цементит по кромке с одной стороны на глубину до 2 мм, графит пластинчатый тип D и E №5 (рис. 8–11).

Усвоение углерода и кремния из модификатора в металле составило 35 и 50%, соответственно. Следовательно, в мелкодисперсном состоянии углерод усваивается в 1,4 раза хуже, чем кремний. Одной из версий низкого усвоения компонентов модификатора может быть наличие большого количества фракции, имеющей размер меньше критического, с точки зрения смачивания и растворения в расплаве чугуна, которая выносится на поверхность зеркала металла и сгорает на воздухе. Однако при увеличении размера фракции модификатора теряется эффект кластерного зарождения включений графита (рис. 12).

Следует учитывать, что усвояемость компонентов модификатора (углерода и кремния) является функцией нескольких переменных: температуры, химического состава (главным образом, содержания углерода, кремния и насыщенности расплава чугуна кислородом), факторов наследственности расплава (тип плавильного агрегата, время ведения плавки и состав шихтовых материалов).

При $d > d_{\text{крит}}$ пропадает эффект кластерного зарождения центров кристаллизации графита, но повышается усвоение модификатора, при $d < d_{\text{крит}}$ имеет место обратный эффект. Под воздействием указанных факторов (температуры, химического состава и наследственности) критический размер фракции модификатора $d_{\text{крит}}$ будет изменяться как в большую, так и в меньшую сторону.

Таким образом, на практике для составляющих модификатора – мелкодисперсного графита, образующего кластерные зародыши графитных включений в чугуне, и мелкокристаллического кремния, усиливающего образование и рост включений графита, главной проблемой является повышение их усвоения расплавом, то есть снижение критического размера фракции модификатора $d_{\text{крит}}$.

Учитывая особенности электропечного чугуна в конкретных условиях производства, а также дисбаланс в усвоении углерода и кремния для дальнейших испытаний может быть предложен модификатор с содержанием углерода 45–55% и кремния 30–40% при суммарном содержании обоих компонентов не менее 85%.

Ввиду того, что в микроструктуре отливки присутствует как феррит, так и цементит, имело место недо-модифицирование расплава.

Исходя из этого, для полноценного модифицирования расплава чугуна является необходимым осуществление одного из мероприятий:

- подача модификатора дозировано на струю в процессе заполнения ковша из печи ожидания и, таким образом, уменьшение его расхода;
- увеличение навески модификатора при стандартном способе его введения – под струю металла единой порцией.

Таким образом, испытание модификаторов МК21 и МККа21 может быть продолжено: для модификатора МК21 – в части увеличения содержания кристаллического кремния и снижения содержания мелкодисперсного графита, для модификатора МККа21 – только для деталей, имеющих проблемы с кромочным отбелом.

Список литературы

1. Витусевич В.Т., Билецкий А.К., Шумихин В.С. Энтальпия образования расплавов системы железо–углерод–кремний // Расплавы. – 1989. – №3. – С. 5–8.
2. Бубликов В. Б. Повышение модифицирующего воздействия на структурообразование в высокопрочном чугуне // Литейное производство. – 2003. – №8. – С. 20–22.
3. Леках С. Н., Шейнерт В. А. Методы повышения эффективности графитизирующего модифицирования чугунов // Литейное производство. – 1994. – №9. – С. 4–6.
4. Худокормов Д. А., Вершинин В. А., Шкурдюк Д. Г. Ковшовое модифицирование как средство снижения брака отливок из ковкого чугуна // Литейное производство. – 2004. – №5. – С. 4–6.
5. Дубров В. В. Про призначення процесу подвійного модифікування та його механізм // Питання теорії і практики виробництва та застосування чавунів з кулястим графітом. Київ: видавництво АН УРСР. 1960. т. IX. С. 22–29.
6. Гаврилин И. В. Строение жидкой и твердой фаз в литейных сплавах в твердожидком состоянии // Металлургия машиностроения. – 2003. – №6. – С. 9–11.