

УДК 621.74

Фесенко М. А.

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЧУГУНА В ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ КАРБИДОСТАБИЛИЗИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ

В различных сферах промышленного производства, строительной индустрии и других областях жизнедеятельности человека эксплуатируется большое разнообразие оборудования, агрегатов, механизмов и машин для добычи, измельчения, размола, перемешивания, а также транспортировки сырья и полуфабрикатов. Во многих случаях одной из основных причин преждевременного повреждения и выхода из строя таких агрегатов, оборудования, механизмов и машин является абразивный износ отдельных их рабочих органов или отдельных деталей [1]. Характерно, что при эксплуатации чаще всего интенсивному износу подвергается не вся деталь машины, а преимущественно только та часть, которая непосредственно контактирует с абразивом. Остальная же часть детали выполняет функцию конструктивного, крепежного элемента, монтажной подкладки или матрицы для рабочего слоя и разрушается только при аварийных ударных нагрузках [2–6].

Следовательно, с учетом функционального назначения и условий работы, к свойствам материала различных частей одной детали могут предъявляться разные, иногда несовместимые между собой, часто взаимоисключающие требования. Так, например, в деталях, подвергающихся абразивному или ударно-абразивному износу, одна (рабочая) часть должна обладать высокой твердостью и износостойкостью, в то время как другая (монтажная или крепежная) часть должна иметь повышенную прочность, пластичность, вязкость и ударостойкость. При этом для того, чтобы удовлетворить комплекс необходимых, часто противоречивых, свойств материала в одной монометаллической детали приходится изготавливать ее из высоколегированных сплавов, что приводит не только к повышению стоимости детали, а, следовательно, и оборудования, агрегата, механизма или машины, где она используется, но и к нерациональному перерасходу легирующих, часто дефицитных, материалов (элементов).

Из относительно дешевых сплавов для деталей, работающих в условиях износа при высоких удельных давлениях и преимущественно без смазки весьма ценным материалом, обладающим высокой абразивной износостойкостью и твердостью является белый чугун с карбидо-перлитной эвтектической структурой и особенно белый чугун мартенситной структуры [7–9].

Однако высокое содержание цементита в белом чугуне серьезно осложняет самостоятельное использование его в качестве конструкционного материала, так как он отличается повышенной хрупкостью и крайне тяжело поддается механической обработке [10].

Повышенной прочностью, значительной вязкостью и относительной пластичностью характеризуется высокопрочный чугун с шаровидным графитом и ферритной металлической матрицей [11]. В то же время такой чугун имеет не высокую твердость (140–200 НВ по ГОСТ9012-59 [12]) и обладает не высокой и часто не достаточной износостойкостью.

Задачу достижения высокой надежности, работоспособности и долговечности деталей, работающих в условиях абразивного или ударно-абразивного износа, при одновременном сокращении расхода дорогостоящих и дефицитных легирующих материалов и снижении себестоимости изделий в значительной степени позволяет решить замена монометаллических изделий биметаллическими и многослойными с дифференцированными свойствами в разных частях, зонах или слоях [1, 13–16]. При этом особый интерес могут представлять именно детали с сочетанием структуры и свойств белого чугуна в рабочей (контактной) части и высокопрочного чугуна с шаровидным графитом в крепежной или монтажной части.

На сегодняшний день производство деталей с дифференцированными свойствами в отдельных частях, слоях или зонах осуществляется различными способами. Наибольший интерес представляют способы получения таких деталей непосредственно из жидких сплавов

методом литья. Чаще всего их получают путем заливки в общую литейную форму с установленной твердой перегородкой (барьером) разнородных жидких сплавов. Последовательной заливкой литейной формы разными расплавами чугунов через две независимые литниковые системы с паузой между заливками, выливанием жидкого остатка одного чугуна с доливкой освобожденной сердцевины расплавом другого чугуна, центробежным литьем с послойной заливкой разными чугунами изложницы, которая вращается, и другими методами [2–6, 17].

Необходимость установки двух плавильных агрегатов для выплавки разных чугунов или последующей внепечной обработки части (порции) исходного расплава, а также необходимость строгой синхронизации процессов выплавки и разлива расплавов разных чугунов являются существенными недостатками перечисленных выше способов изготовления отливок с дифференцированными структурой и свойствами [4–6].

На кафедрах литейного производства черных и цветных металлов НТУУ «КПИ» (г. Киев) и технологии и оборудования литейного производства Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА) (г. Краматорск) предложены новые способы изготовления отливок с дифференцированными структурой и свойствами в разных частях или слоях отливки из одного базового расплава чугуна [18–25]. Устраняющие указанные выше недостатки и базирующиеся на использовании технологии модифицирования расплава чугуна внутри литейной формы [26, 27]. Среди них отрабатывается и один из наиболее востребованных технологических вариантов изготовления литых деталей со структурой и свойствами твердого износостойкого белого чугуна в рабочей части и вязкого ударостойкого высокопрочного чугуна в крепежной (монтажной) ее части из исходного серого чугуна [23].

Сущность исследуемого варианта заключается в разделении исходного жидкого серого чугуна (СЧ) во время заливки литейной формы симметричной относительно стояка литниковой системой на два независимых потока. Один из которых направляется в одну часть полости общей литейной формы, проходя на своем пути через проточную реакционную камеру с карбидостабилизирующим модификатором (КМ), а другой – через реакционную камеру со сфероидизирующим модификатором (СМ) направляется в другую часть полости формы (рис.1). В случае не смешивания потоков разномодифицированных жидких чугунов при заливке полости формы, одна часть отливки кристаллизуется из белого чугуна (БЧ), а другая часть – из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧ).

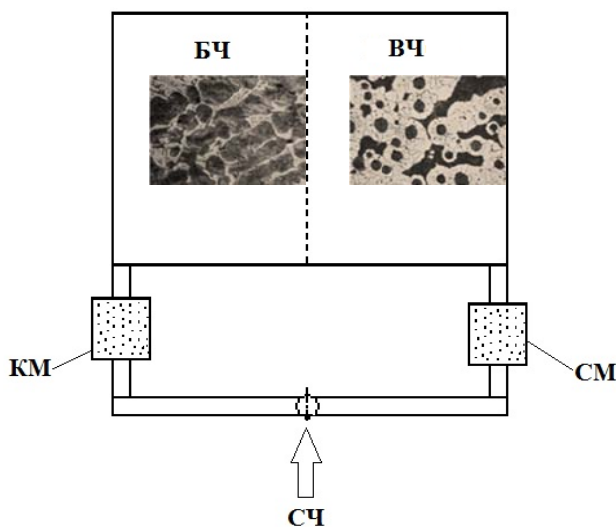


Рис. 1. Схема технологического варианта получения литой двухслойной детали из белого (БЧ) и высокопрочного (ВЧ) чугунов на базе исходного серого (СЧ) чугуна, с модифицированием металла в литейной форме сфероидизирующим (СМ) и карбидостабилизирующим (КМ) модификаторами

Однако для достижения максимального эффекта дифференциации структуры и свойств при реализации новой технологии необходимо обеспечить за счет внутриформенного дифференцированного модифицирования, прежде всего гарантированное стабильное получение в одной части отливки структуры и свойств высокопрочного чугуна, а в другой ее части – структуры и свойств белого чугуна, что вызывает необходимость выбора оптимальных добавок для эффективного карбидостабилизирующего и сфероидизирующего модифицирования серого чугуна в литейной форме, а так же поиска и реализации оптимальных режимов литья и затвердевания отливки.

Технологии сфероидизирующей обработки чугуна в литейной форме с целью получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом посвящено значительное число работ отечественных и зарубежных авторов. Из анализа практических и литературных данных, а также результатами исследований с участием автора установлено, что для внутриформенного сфероидизирующего модифицирования расплава серого чугуна наиболее целесообразным является применение низкопроцентных магнийсодержащих добавок (модификаторов), чаще всего сплавов ферросилиция с магнием типа ФСМг [28–32]. На практике технология сфероидизирующего модифицирования расплава чугуна отработана и оптимизирована и позволяет при строгом соблюдении технологических параметров (режимов) достаточно надежно и стабильно получать в отливках заданную структуру и свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

Технология внутриформенной обработки карбидостабилизирующими добавками исходного серого чугуна эвтектического или близкого к эвтектическому состава с целью получения твердого износостойкого белого чугуна на сегодняшний день не вызвала особого интереса у специалистов, что требует постановки и проведения соответствующих исследований.

Целью данной работы является исследование влияния карбидостабилизирующих добавок на структуру и твердость чугуна после внутриформенной обработки расплава.

При производстве отливок из белого чугуна для получения заданной структуры и свойств (твердости, износостойкости и др.) необходимо подавить процесс графитизации и исключить выделение свободного графита в течение всего времени кристаллизации жидкого металла. Наличие в части сечения отливок структуры, отличной от структуры белого чугуна, понижает его свойства.

Многочисленными исследованиями установлено, что твердость белого чугуна возрастает с ростом доли карбидов в его структуре, а, следовательно, и с увеличением содержания углерода. При растворении в карбиде железа примесей и образовании сложных карбидов твердость их и белого чугуна повышается. По интенсивности влияния на твердость белого чугуна основные и легирующие элементы располагаются в следующей последовательности (по убывающей) начиная с углерода, определяющего количество карбидов и интенсивнее иных элементов увеличивающего твердость чугуна: никель, фосфор, марганец, хром, молибден, ванадий, кремний, медь, титан, сера [10]. Наивысшую твердость имеет белый чугун с мартенситной структурой основной металлической массы. Особо высокой твердостью (HB 800-850) обладает чугун с содержанием 0,7–1,8 % бора [33].

Из всех карбидостабилизирующих элементов для чугунов наибольшее распространение получили хром, молибден, ванадий, марганец, бор [34, 35].

Перечисленные элементы стимулируют формирование стабильных карбидов типа $(\text{FeX})_3\text{C}$, которые сохраняют свою устойчивость даже после высокотемпературного графитизирующего отжига [35].

Учитывая это, в условиях эксперимента для обработки исходного серого чугуна эвтектического состава первоначально были выбраны широко доступные добавки – феррохром марки ФХ900, ферробор ФБ18 и металлический марганец Мн95, химический состав которых представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых карбидостабилизирующих добавок

Марка добавки	Содержание химических элементов, % мас.												
	C	Si	P	S	Fe	Cr	Mg	Ni	B	Mn	Al	PЗМ	Cu
ФХ900	9,0	2,0	0,05	0,04	ост.	65,0	-	-	-	-	-	-	-
ФБ18	0,05	2,0	0,02	0,01	ост.	-	-	-	18,0		3,0	-	0,5
Мн95	0,5	-	0,05	0,03	-	-	-	-	-	95,0	-	-	-

Объектом исследования была выбрана ступенчатая проба массой $5,0 \pm 0,2$ кг с сечениями стенок 5, 10, 20, 30, 40, 50 мм и литниковой системой, которая включала кубическую проточную реакционную камеру с длиной ребра 40 мм для размещения модифицирующих или легирующих добавок (рис. 2, а).



Рис. 2. Общий вид чугуных ступенчатых проб (а) и литейной формы перед сборкой (б) для их изготовления

Параметрами оптимизации процесса служили цвет излома, структура и твердость чугуна в различных сечениях пробы.

Исходный серый чугун выплавляли в индукционной тигельной электропечи марки ИЧТ-006 с кислой футеровкой на шихте, состоящей из литейного рафинированного чушкового чугуна ЛР7 и возврата серого чугуна марки СЧ20.

Карбидостабилизирующие добавки с размером частиц 1,0–2,5 мм засыпали в реакционные камеры в количестве 2,0 % от массы отливки.

Сухие песчано-глинистые формы (рис. 2, б) заливали открытым ручным ковшом в течение 14–16 с. Температуру заливки расплава варьировали от 1 420 до 1 560 °С.

В результате проведения комплекса экспериментальных исследований установили, что за время заливки литейных форм зернистые добавки ФХ900, ФБ18, Мн95 в исследуемом интервале температур не успевают в значительном количестве раствориться и усвоиться металлом отливок. Основная масса присадок остается в реакционной камере в исходном или частично спекшемся состоянии (рис. 3).



Рис. 3. Вид снизу на реакционные камеры с остатками непрореагировавших добавок: а – ФБ18; б – ФХ900; в – Мн95

На рис. 4 для примера приведены фото изломов, а на рис. 5 – микроструктуры образцов, вырезанных из различных сечений экспериментальных отливок – ступенчатых проб, полученных из базового серого чугуна с обработкой в процессе заливки формы в проточной реакционной камере литниковой системы добавкой феррохрома. Как видно, во всех сечениях проб (даже в тонких 5 и 10 мм) чугун кристаллизовался без отбела, с темно-серым цветом излома (рис. 4). Микроструктура образцов практически не отличалась от структуры исходного чугуна и состояла из пластинчатого графита в перлитной металлической матрице (основе) (рис. 5). Твердость чугуна в разных сечениях проб составляла 150–170 НВ.

Подобные структуры и близкие значения твердости получены и при внутриформенной обработке другими карбидостабилизирующими добавками (ФБ18, Мн95).

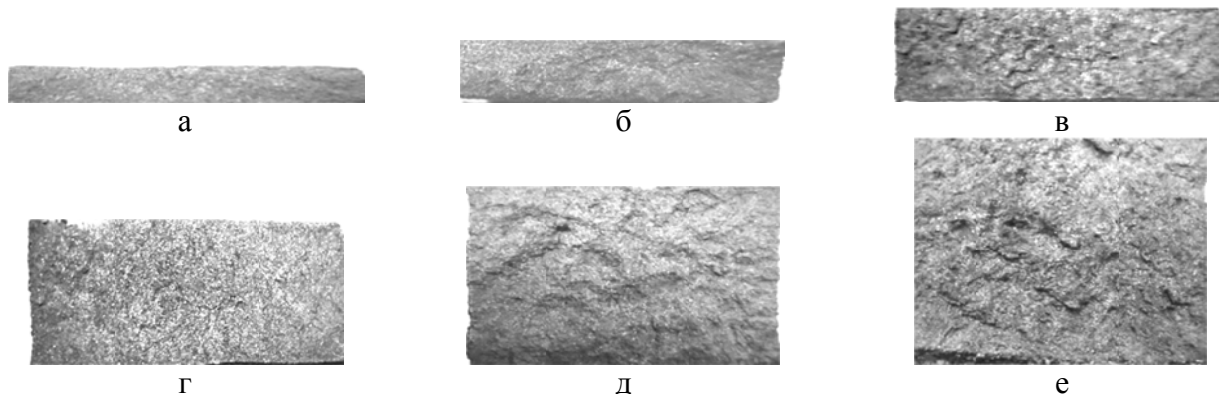


Рис. 4. Цвет излома в сечениях пробы 5 (а), 10 (б), 20 (в), 30 (г), 40 (д) и 50 (е) мм после обработки добавками ФХ900

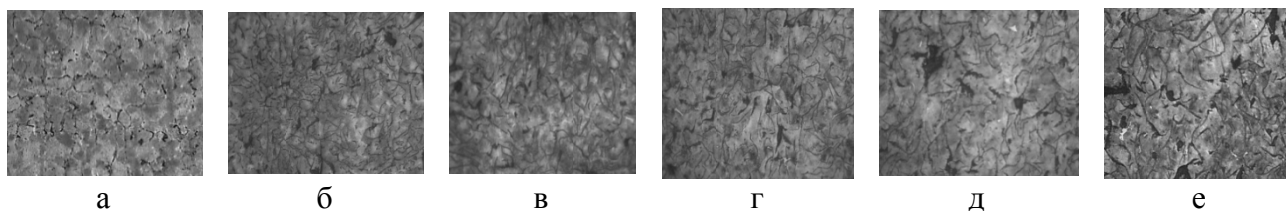


Рис. 5. Микроструктура чугуна, модифицированного добавками ФХ900 в сечениях проб 5 (а), 10 (б), 20 (в), 30 (г), 40 (д), 50 (е) мм

Очевидно, что достаточно высокая температура плавления, повышенная плотность исследуемых добавок, а также возможно наличие тугоплавких защитных окисных пленок Cr_2O_3 , V_2O_5 , MnO , образующихся на поверхности зерен, препятствуют их эффективному растворению в потоке чугуна и усвоению металлом отливки.

Общеизвестно, что для снижения температуры плавления и вязкости шлака на основе окисных пленок на практике обычно применяют активный флюс типа плавикового шпата или криолита. Учитывая это, в серии дополнительных плавов к 2,0 % (от массы отливки) феррохрома, ферробора или металлического марганца в реакционные камеры добавляли 1,2 % плавикового шпата (рис. 6, а) и повышали температуру заливки до 1580–1600°C. Однако и в этом случае после заливки и выбивки форм на дне реакционных камер все равно оставалась часть не прореагировавших частиц модифицирующих смесей (рис 6, б). Цвет излома во всех сечениях проб и в этом случае оставался темно-серым. Структура и твердость образцов, вырезанных из разных сечений проб, полученных в данном эксперименте, были сопоставимы с предыдущими результатами.

Рядом исследований показано, что стабилизировать карбиды железа ледебурита из заэвтектического чугуна возможно с помощью трудноразделимого сплава редких и редкоземельных металлов – так называемого мишметалла [36]. Другими исследователями с той же целью в процессе производства износостойких чугунов типа «Нихард» использовалась никель – магниева лигатура [37].

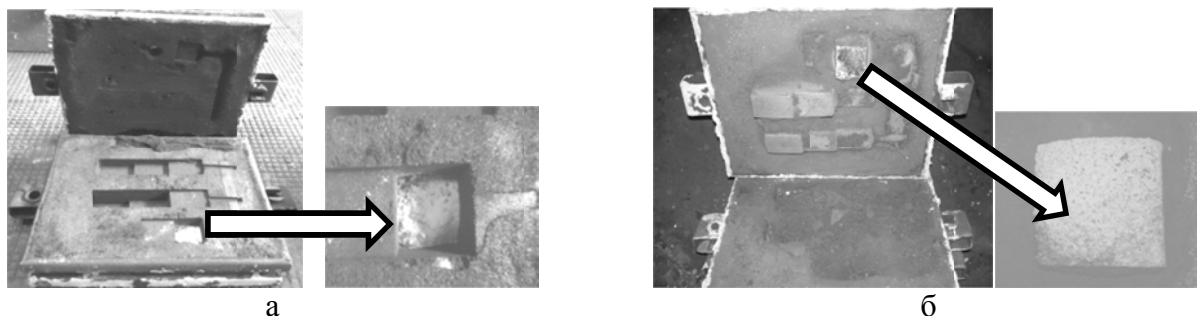


Рис. 6. Общий вид литейной формы с добавлением к карбидостабилизирующим добавкам плавикового шпата до заливки (а) и после выбивки форм (б)

Основываясь на этих фактах в качестве карбидостабилизирующих присадок для внутриформенного модифицирования, в дальнейших исследованиях решили применять никель – магниевый сплав марки НМг19 и цериевый мишметалл Це48Ла28Нд14Мг4, химический состав которых представлен в табл. 2. Методика проведения экспериментов была идентична предыдущей.

Таблица 2

Химический состав модифицирующих добавок НМг19 и Це48Ла28Нд14Мг4

Марка добавки	Содержание химических элементов, % мас.							
	Si	Fe	Cr	Mg	Ni	PЗМ		
						Ce	La	Nd
НМг19	-	-	-	19,0	ост.	-	-	-
Це48Ла28Нд14Мг4	0,3	3,31	2,29	4,1	-	48,0	28,0	14,0

По результатам проведенных исследований установили, что после внутриформенного модифицирования исходного серого чугуна дроблеными зернистыми сплавами НМг19 и Це48Ла28Нд14Мг4 во всех сечениях ступенчатой пробы чугун кристаллизуется по метастабильной системе со сквозным отбелом даже в толстых сечениях проб 50 мм (рис. 7). После травления все образцы, вырезанные из ступенчатых проб, имели перлито-цементитную структуры с укрупнением структуры по мере увеличения толщины сечения пробы (рис. 8).

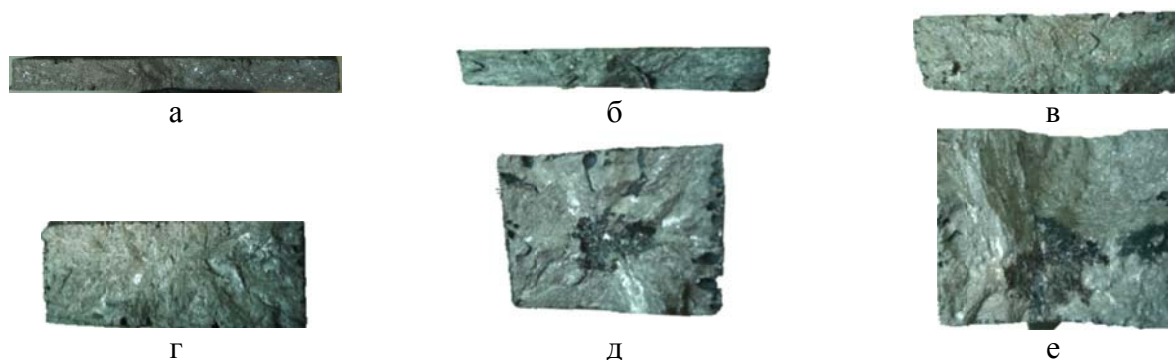


Рис. 7. Цвет излома в сечениях пробы 5 (а), 10 (б), 20 (в), 30 (г), 40 (д) и 50 (е) мм после обработки сплавом НМг19

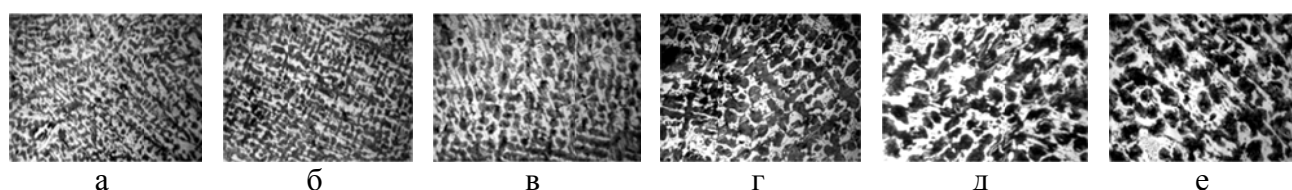


Рис. 8. Микроструктура чугуна, модифицированного сплавом никеля с магнием и цериевого мишметалла в сечениях проб 5 (а), 10 (б), 20 (в), 30 (г), 40 (д), 50 (е) мм

Карбидостабилизирующим внутриформенным модифицированием сплавом NiMg19 твердость чугуна удалось повысить с 150–170 HB до 400–420 HB, а сплавом Ce48La28Nd14Mg4 – до 360–400 HB.

Таким образом, по результатам исследований установлено, что при изготовлении отливок из исходного серого чугуна эвтектического состава обеспечить стабильный отбел в сечениях отливок до 50 мм позволяет внутриформенное модифицирование расплава карбидостабилизирующими сплавами никеля с магнием или цериевого мисметалла. Однако, несмотря на эффективность обработки чугуна данными добавками, учитывая достаточно высокую их стоимость [38]), необходимо продолжать исследования по выбору эффективных, дешевых и более доступных сплавов для карбидостабилизирующей обработки исходного серого чугуна в литейной форме или же вести дальнейший поиск технологических условий (способ, варианты и т. д.) для достаточного усвоения расплавом чугуна добавок ФХ900, ФБ18 и Mn95 при внутриформенной его обработке.

ВЫВОДЫ

Установлено, что внутриформенная обработка расплава исходного серого чугуна эвтектического состава в диапазоне температур 1 420 до 1 560 °С широкодоступными дробленными добавками – феррохромом марки ФХ900, ферробором ФБ18 и металлическим марганцем Mn95 не обеспечивает формирования в отливках структуры и свойств твердого износостойкого белого чугуна. Сквозной отбел в отливках сечением до 50 мм достигается при внутриформенном модифицировании расплава базового чугуна сплавами никеля с магнием марки NiMg19 или цериевого мисметалла Ce48La28Nd14Mg4. В результате карбидостабилизирующего внутриформенного модифицирования сплавом NiMg19 твердость чугуна повысилась с 150–170 HB до 400–420 HB, а после модифицирования сплавом Ce48La28Nd14Mg4 – до 360–400 HB.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каричковский П. Н. Способы повышения технического ресурса, эксплуатационной надежности рабочих органов дробильно-размольного оборудования / П. Н. Каричковский, И. О. Шинский, Л. М. Клименко // *Металл и литье Украины*. – № 7-8. – 2009. – С. 56–60.
2. Лакедемонский А. В. Биметаллические отливки / А. В. Лакедемонский – М. : Машиностроение, 1964. – 180 с.
3. Технологические режимы получения биметаллических отливок на основе сплавов железа / Г. Д. Костенко, А. А. Снежко, Б. П. Веселов, П. И. Кошеленко, В. С. Мельник // В кн. : *Литье биметаллических изделий*. – Киев, ИПЛ АН УССР, 1976. – С. 62–73.
4. Лузан П. П. Основные направления исследований в области получения отливок с дифференцированными физико-механическими свойствами / П. П. Лузан // В кн. : *Многослойное литье*. – Киев, 1970. – С. 3–8.
5. Позняк Л. А. Основные направления производства литых биметаллов / Л. А. Позняк, Г. Д. Костенко, А. А. Снежко // В кн. *Литье биметаллических изделий*. – ИПЛ АН УССР, Киев, 1976. – С. 3–15.
6. Гидродинамические особенности процессов получения биметаллических отливок / Г. Д. Костенко, О. А. Пеликан, Ю. Н. Романенко, Д. Г. Костенко // *Процессы литья*, 2006. – № 1. – С. 69–73.
7. Цыпин И. И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства / И. И. Цыпин – М. : Металлургия. – 1983. – 176 с.
8. Гарбер М. Е. Г20 Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация / М. Е. Гарбер – М. : Машиностроение, 2010. – 280 с. : ил.
9. Словари и энциклопедии на Академике [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://investments.academic.ru/1540/Чугун>.
10. Профессиональный портал «Сварка. Резка. Металлообработка» [autoWelding.ru!](http://autoWelding.ru/) [Электронный ресурс] – Режим доступа : http://www.autowelding.ru/publ/1/1/belyj_chugun/4-1-0-532.
11. ДСТУ 3925-99 Чавун з кулястим графітом для виливків. Марки.
12. ГОСТ9012-59. Металлы. Методы измерения твердости по Бринеллю.
13. Технологические основы получения крупногабаритных литосварных биметаллических конструкций / И. О. Шинский, О. А. Пеликан, В. В. Ширяев, П. Н. Каричковский, Ю. Н. Романенко // *Литейное производство*, 2008. – № 9. – С. 24–27.
14. Физико-химические, теплофизические и гидродинамические особенности процессов формирования биметаллических (двухслойных) отливок [Электронный ресурс] / И. О. Шинский, О. А. Пеликан, В. В. Ширяев, Д. В. Глушков, Ю. Н. Романенко, Л. М. Клименко – Режим доступа : <http://www.lgm.com.ua/publications/LGM-Group-Publication72.doc>.

15. Костенко Г. Д. Износостойкие биметаллические отливки на основе сплавов железа / Г. Д. Костенко, О. А. Пеликан, Д. Г. Костенко // *Металл и литье Украины*. – № 9-10. – 1998. – С. 30–33.
16. Исследование физико-химических процессов при формировании биметаллическихливок на основе железо-углеродистых сплавов / Г. Д. Костенко, Л. М. Дилюк, Д. Г. Костенко, О. А. Пеликан, С. А. Болгар, Л. М. Клименко // *Процессы литья*, 2006. – № 3. – С. 37–41.
17. Технологические особенности производства биметаллических (многослойных)ливок повышенной износостойкости / В. В. Ширяев, О. А. Пеликан, И. О. Шинский, Д. В. Глушков, Ю. Н. Романенко // *Металл и литье Украины*. – 2009. – № 7–8. – С. 52–55.
18. Фесенко М. А. Внутриформенное модифицирование для получения чугуновыхливок с дифференцированной структурой и свойствами / М. А. Фесенко, А. Н. Фесенко, В. А. Косячков // *Литейное производство*. – 2010. – № 1. – С. 7–13.
19. Патент №27681 U 2007 07328, B22D 27/00. Спосіб виготовлення виливків з диференційованими властивостями / Фесенко М. А., Косячков В. О., Фесенко А. М. – Опубл. 12.11.2007, Бюл. № 18, 2007 р.
20. Патент № 41383 U 2008 11908, B22D27/00. Спосіб виготовлення виливків з диференційованими структурою і властивостями / Фесенко А. М., Фесенко М. А., Косячков В. О., Ємельяненко К. В. – Опубл. 25.05.2009. Бюл. № 10, 2009 р.
21. Патент № 42795 U 2009 00009, B22D27/00. Спосіб виготовлення виливків з диференційованими структурою і властивостями / Фесенко М. А., Фесенко А. М., Косячков В. О., Ємельяненко К. В. – Опубл. 27.07.2009, Бюл. № 14, 2009 р.
22. Патент № 54267 U 2009 13101, B22D27/00. Спосіб виготовлення виливків з диференційованими структурою і властивостями / Фесенко М. А., Фесенко А. М., Косячков В. О. – Опубл. 11.11.2010, Бюл. № 21, 2010 р.
23. Патент № 32662 U 2008 00343, B22D 27/00. Спосіб виготовлення виливків з диференційованими структурою і властивостями / Фесенко А. М., Фесенко М. А., Косячков В. О. – Опубл. 26.05.2008, Бюл. № 10, 2008 р.
24. Патент № 42477 U 2009 00188, B22D 27/00. Спосіб виготовлення виливків з диференційованими структурою і властивостями / Фесенко А. М., Фесенко М. А., Косячков В. О., Ємельяненко К. В. – Опубл. 10.07.2009, Бюл. № 13, 2009 р.
25. Патент № 54266 U 2009 13097, B22D27/00. Спосіб виготовлення виливків з диференційованими структурою і властивостями / Фесенко М. А., Фесенко А. М., Косячков В. О. – Опубл. 11.11.2010, Бюл. № 21, 2010 р.
26. McCaulay J. L. Production of nodulagraphite iron casting by the in mold-process / J. L. McCaulay – *Foundry trade journal*, 1971. – № 4. – P. 327–332, 335.
27. Косячков В. А. особенности технологии получения высокопрочного чугуна модифицированием в форме / В. А. Косячков, К. И. Ващенко // *Литейное производство*. 1975. – № 12. – С. 11–12.
28. Бубликов В. Б. Об особенностях модифицирования чугуна в вертикально-проточной реакционной камере / В. Б. Бубликов // *Процессы литья*. – 2003. – № 3. – С. 29–35.
29. Косячков В. А. Оптимизация присадок для дифференцированного графитизирующего, карбидостабилизирующего и сфероидизирующего модифицирования чугуна в литейной форме / В. А. Косячков, М. А. Фесенко, Д. В. Денисенко // *Процессы литья*. – 2005. – № 4. – С. 34–40.
30. Болдырев Д. А. Внутриформенное модифицирование чугуна магниевым модификатором с лантаном / Д. А. Болдырев // *Литейное производство*, 2006. – № 5. – С. 10–13.
31. Knustad O. Проблемы, возникающие при производстве высокопрочных чугунов. Обзор существующих способов получения ВЧ и используемых модификаторов / О. Knustad // *Литейщик России*, 2011. – № 4. – С. 15–17.
32. Knustad O. Проблемы, возникающие при производстве высокопрочных чугунов. Обзор существующих способов получения ВЧ и используемых модификаторов / О. Knustad // *Литье Украины. Информационно-технический бюллетень*. – № 33 (79). – 2007. – С. 7–16.
33. Литейное производство. Чугунное литье, литье бронзы, латуни. Производство поковок. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.uzsm.ru/spravka/metall/chugun/bel.php>.
34. Гиришович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках / Н. Г. Гиришович. – М.-Л. : Машиностроение, 1966. – 564 с.
35. Бобро Ю. Г. Легированные чугуны / Ю. Г. Бобро. – М. : Металлургия, 1976. – 287 с.
36. Millis K. D. Spheroidal graphite cast-iron – its development and future / K. D. Millis. // *The British Foundryman*. – 1972. – № 1. – P. 6–10.
37. Iron Age / A. P. Gagnebin, K. D. Millis, N. B. Pilling, 1949. – 163, N 7. – P. 77–84.
38. Мишметалл в Украине - Prom.ua [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://prom.ua/Mishmetall.html>.