
ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА РАСПЛАВОВ

УДК 669.162.275

**В. Б. Бубликов, Ю. Д. Бачинский, Е. П. Нестерук,
А. А. Ясинский**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФИКАТОРА ЖКМК-2Р. Технологический регламент. Характер распределения контролируемых химических элементов в плавках высокопрочного чугуна. Сообщение 1.

Приведены данные об основных технологических операциях и контролируемых параметрах производственного процесса получения высокопрочного чугуна ВЧ420-12 с применением комплексного модификатора ЖКМК-2Р. Определен и проанализирован характер распределения содержания углерода, кремния, марганца, магния, серы, фосфора в металле отливок. С применением методов статистического анализа установлены и проанализированы закономерности варьирования химического состава в 100 плавках высокопрочного чугуна ВЧ420-12. Полученные результаты позволяют определить основные направления улучшения качества отливок за счет корректировки ряда технологических параметров и сужения диапазонов содержания серы, магния, кремния.

Ключевые слова: химический состав, высокопрочный чугун, комплексный модификатор, эмпирическое распределение, кривая Гаусса.

Наведено дані про основні технологічні операції і контрольовані параметри виробничого процесу отримання високоміцного чавуну ВЧ420-12 із застосуванням комплексного модифікатора ЖКМК-2Р. Визначено і проаналізовано характер розподілу вмісту вуглецю, кремнію, марганцю, магнію, сірки, фосфору в металі виливків. Із застосуванням методів статистичного аналізу встановлено та проаналізовано закономірності варіювання хімічного складу в 100 плавках високоміцного чавуну ВЧ420-12. Отримані результати дозволяють визначити основні напрями поліпшення якості виливків за рахунок коригування ряду технологічних параметрів і звуження діапазонів вмісту сірки, магнію, кремнію.

Ключові слова: хімічний склад, високоміцний чавун, комплексний модифікатор, емпіричний розподіл, крива Гауса.

Data on the main technological operations and controlled parameters of the production process of ductile cast iron ВЧ420-12 obtaining with the use of a complex modifier ЖКМК-2Р (FeSiMgCa-

2RE) are given. The features of carbon, silicon, manganese, magnesium, sulfur, phosphorus content distribution in the metal of castings is defined and analyzed. With help of statistical analysis methods the laws of chemical composition variation in 100 melts of ductile cast iron BЧ420-12 are determined and analyzed. The obtained results allow to determine the main directions of castings quality improving due to the adjustment of several process parameters and narrowing of sulfur, magnesium and silicon content ranges.

Keywords: chemical composition, ductile cast iron, complex modifier, empirical distribution, Gaussian curve.

Производственный процесс получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом представляет собой сложную систему, подверженную влиянию постоянно изменяющихся многочисленных факторов, под воздействием которых формируется структура и механические свойства отливок. В технологии высокопрочного чугуна контролируются далеко не все, а только основные факторы, регулированием которых обеспечивается получение заданных структуры и свойств. Вследствие неизбежных колебаний значений как контролируемых (основных), так и неконтролируемых факторов производственного процесса наблюдается определенное рассеивание показателей механических свойств, которые являются основной характеристикой качества высокопрочного чугуна. Принятая в ДСТУ 3925-99 маркировка высокопрочного чугуна по минимальному уровню достигаемых механических свойств ограничивает представление о возможностях этого конструкционного материала. Более полную характеристику механических свойств дает закон распределения, устанавливающий связь между возможными значениями показателей и соответствующими им вероятностями. Применение методов статистического анализа позволяет также выявить закономерности распределения содержания химических элементов, других контролируемых технологических параметров в плавках высокопрочного чугуна и их влияние на структуру и механические свойства.

Цель работы – исследование закономерностей влияния колебаний контролируемых технологических параметров производственного процесса на распределение механических свойств в плавках высокопрочного чугуна с помощью методов статистического анализа и определение основных направлений повышения показателей качества литых изделий.

Методом статистического анализа обработаны и проанализированы результаты 100 промышленных плавков высокопрочного чугуна марки ВЧ 420-12. С помощью метода математической статистики проведена оценка резко выделяющихся данных, определены границы доверительных интервалов, оценена существенность различия между двумя средними значениями и между двумя дисперсиями, рассчитаны статистические характеристики, построены гистограммы эмпирических распределений и проведено их сравнение с теоретическими распределениями, которые описываются кривыми Гаусса [1, 2].

Исходный чугун выплавляли в дуговой электропечи ДС-0,5 с кислой футеровкой методом переплава металлической шихты. Масса металла в плавке – 800 кг. Обязательным компонентом шихты был передельный чугун П2 производства металлургического завода А. Вторым компонентом служил литейный чугун того же завода или металлургического завода Б. В шихту ряда плавков совместно с указанными компонентами вводили возврат высокопрочного чугуна. Усредненный химический состав чушковых чугунов и возврата высокопрочного чугуна приведен в таблице.

Согласно заводской инструкции содержание химических элементов в высокопрочном чугуне ВЧ 420-12 регламентируется в следующих пределах: $C = 3,0-3,5$; $Si = 2,5-3,2$; $Mn \leq 0,5$; $P < 0,1$; $S < 0,02$; $Mg \geq 0,04$ %. При расчете шихты угар кремния и марганца принимали 10 %. Усвоение кремния чугуном в процессах сфероидизирующего и графитизирующего модифицирования считали равным 0,7 % от его содержания в модификаторе.

Химический состав компонентов шихты промышленных плавков

Компонент шихты	Массовая доля элемента, %				
	C	Si	Mn	P	S
Чугун передельный П2 (А)	4,32	0,47	0,25	0,05	0,016
Чугун литейный Л5 (А)	4,34	1,56	0,33	0,08	0,03
Чугун литейный Л4 (А)	4,11	2,12	0,27	0,08	0,02
Чугун литейный Л4 (Б)	3,99	2,05	0,67	0,09	0,03
Чугун литейный Л3 (Б)	3,85	2,65	0,65	0,08	0,02
Возврат высокопрочного чугуна	3,30	3,00	0,35	0,08	0,015

Во время выпуска из печи в ковш проводилась десульфурация чугуна кальцинированной содой в количестве 0,6 % от массы металла. Сравнительный химический анализ чугуна до и после обработки содой показал, что в результате десульфурации содержание серы снижается на 25-30 %. Это благоприятно влияет как на результат сфероидизирующего модифицирования, так и на пластические свойства высокопрочного чугуна.

Температура металла при выпуске из печи, измеряемая оптическим пирометром, находилась в пределах 1500-1540 °С.

Сфероидизирующее модифицирование чугуна проводили комплексным модификатором (КМ) марки ЖКМК-2Р, содержащей Mg = 7,85; Ca = 12,4; PЗМ = 1,2; Si = 50 %; Fe – остальное [3, 4]. Температура расплава чугуна в ковше перед модифицированием составляла 1420-1440 °С. Контроль температуры осуществляли платиновой или платино-родиевой термопарой. В связи с проводившейся оптимизацией процесса сфероидизирующего модифицирования расход ЖКМК-2Р в рассматриваемых плавках менялся и составлял 3,0; 2,6 и 2,2 % от массы жидкого металла. Дробленый модификатор перемешивали с молотым плавиковым шпатом (0,6 % от массы жидкого металла) и упаковывали в стальной сварной колокол. Введение колокола в ковш с чугуном и удаление газов, выделяющихся в процессе модифицирования, проводилось в специальной камере. В ходе модифицирования комплексным модификатором ЖКМК-2Р с содержанием 12,4 % кальция, являющегося эффективным модифицирующим химическим элементом с высокой десульфураторной способностью, обеспечивалось снижение содержания серы в чугуне на 20-25 %.

После сфероидизирующей обработки с зеркала металла удаляли шлак и проводили графитизирующее модифицирование ферросилицием ФС75 (0,6 % от массы жидкого металла). Затем при температуре 1330-1360 °С металл заливали в сухие песчано-глинистые формы. С каждой плавки отливали стандартную клиновидную пробу (с толщиной у основания 25 мм) для определения химического состава, микроструктуры и механических свойств высокопрочного чугуна.

Для повышения пластичности и ударной вязкости высокопрочного чугуна в электрических камерных печах Г30 проводили ферритизирующий отжиг отливок совместно с клиновидными пробями. Перепад температур по высоте и длине рабочего пространства печи составлял менее 30 °С, горячий спай термопар находился на расстоянии не более 100 мм от верхней кромки отливок. Режим отжига: нагрев до температуры 760-780 °С, выдержка 6 часов, охлаждение с печью до 620 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе.

Из контролируемых входных параметров технологического процесса значительное

влияние на формирование структуры и механических свойств высокопрочного чугуна оказывает его химический состав. Контролировали химический состав шихтовых материалов, ферросплавов, модификаторов и чугуна в процессе плавки. В отливках определяли содержание углерода, кремния, марганца, магния, серы, фосфора. Отмечено значительное колебание химического состава, вызванное влиянием факторов, которые практически трудно контролировать и учитывать. Рассмотрим основные причины, определяющие рассеивание содержания химических элементов в высокопрочном чугуне.

Составляющие шихты, ферросплавы и модификаторы характеризуются определенной неоднородностью химического состава даже в пределах одной партии поставки. Расчет же химического состава проводится на основании предположения, что все компоненты шихты и присадок имеют определенный средний химический состав. Угар элементов при плавке в расчетах принимается также постоянным, а фактически зависит от режима плавки и характеризуется значительными поплавочными колебаниями.

Большое влияние на изменение состава чугуна оказывает процесс сфероидизирующего модифицирования, при котором в чугун переходит от 60 до 90 % кремния, находящегося в комплексном модификаторе. Помимо этого, компоненты комплексного модификатора образуют соединения с рядом элементов чугуна (серой, углеродом и др.), часть которых удаляется из металла в виде шлака или газа. Значительной неравномерностью перехода кремния в чугун характеризуется также процесс графитизирующего модифицирования 75 %-ным ферросилицием, вводимым на поверхность расплава в ковше.

Среднее содержание контролируемых химических элементов для рассматриваемой выборки плавок высокопрочного чугуна составила (в %): 3,30 С; 2,90 Si; 0,35 Mn; 0,06 Mg; 0,012 S; 0,09 P.

Рассмотрим распределение содержания основных химических элементов.

Углерод. Принятый технологический процесс не предусматривал специальных операций по управлению содержанием углерода. Конечное содержание углерода в чугуне зависит от его доли в шихтовых материалах, потерь при плавке за счет всплывания в шлак крупных включений графита (спели), а также от содержания кремния, снижающего растворимость углерода в железе. Определенное влияние на баланс углерода в чугуне оказывает науглероживание его графитовыми электродами печи. При модифицировании часть углерода переходит из чугуна в шлак в виде образовавшихся карбидов кальция, что подтверждается выделением ацетилена при замачивании шлака. Происходит также образование и всплытие включений графита на поверхность расплава в результате уменьшения растворимости углерода при усвоении чугуном большого количества кремния при проведении сфероидизирующего и графитизирующего модифицирования. Всплыванию графита способствует барботаж расплава парами магния.

Установлено, что потери углерода при плавке чугуна составляют в среднем 12 % от начального содержания. С повышением углерода в шихте возрастают и его потери при плавке. Снижение углерода в результате модифицирования варьируется от плавки к плавке, уменьшаясь в среднем на 10 % по отношению к его содержанию в чугуне до модифицирования.

Содержание углерода в отливках находилось в пределах 3,0-3,6 %.

Из гистограммы эмпирического распределения (рис. 1) следует, что частоты получения содержания углерода при выбранном интервале варьирования (0,1 %) весьма близки и для большинства плавок составляют от 16 до 23 %. Только в интервале 3,5-3,6 % частота составляет 2 %.

В общем, полученное эмпирическое распределение довольно хорошо согласуется с нормальным. Некоторое несовпадение площадей, описанных гистограммой и кривой нормального распределения, вызвано тем, что при теоретическом распределении частота попадания в интервал 3,2-3,4 % С должна быть

выше полученной при наблюдениях. Кривая нормального распределения вытянута в центральной части и круто спадает к оси абсцисс. Это свидетельствует о тесном группировании измерений около центра и незначительном рассеивании результатов.

Проведенный статистический анализ позволяет сделать вывод о стабильном характере процессов, вызывающих изменение содержания углерода.

Кремний. В условиях, когда технологией не предусматривается специальное изменение углерода, то есть условно можно считать его содержание постоянным, величина углеродного эквивалента определяется содержанием кремния в чугуна. Содержание кремния является одним из главных факторов, определяющих ход процессов кристаллизации, графитизации и структурообразования чугуна. Значительна также роль кремния в процессах модифицирования, так как он является основой сфероидизирующих и графитизирующих модификаторов, обеспечивая предотвращение отбела отливок.

Кремний относится к числу основных факторов управления структурообразованием металлической основы и механическими свойствами нелегированного высокопрочного чугуна.

Окончательное содержание кремния в металле отливок складывается в результате проведения трех технологических операций: доводки по кремнию расплавленного металла в печи, сфероидизирующего модифицирования ЖКМК-2Р и графитизирующего модифицирования 75%-ным ферросилицием. В анализируемых плавках содержание кремния варьировалась от 2,4 до 3,4 %. Расчетное среднее содержание кремния для всех плавков составило 2,95 %.

Из гистограммы эмпирического распределения (рис. 2) следует, что частоты распределения кремния для всех интервалов длиной 0,1 % весьма близки и составляют 9-15 %, за исключением первого интервала (4,0 %). Форма гистограммы свидетельствует о том, что полученное эмпирическое распределение кремния не подчиняется нормальному закону, то есть содержание кремния в плавках имеет неслучайное рассеивание. Кривая нормального распределения имеет пологий вид, что свидетельствует о значительном рассеивании содержания кремния в плавках.

Сравнение распределения углерода и кремния, содержания которых в чугуна являются близкими, показывает, что размах варьирования содержания кремния в два раза шире, чем содержания углерода.

Анализ распределения содержания кремния позволил установить, что в результате ввода кремния при сфероидизирующем и графитизирующем модифицировании его эмпирическое распределение не подчиняется закону нормального распределения и характеризуется значительным размахом варьирования и невысокой вероятностью воспроизводимости результатов.

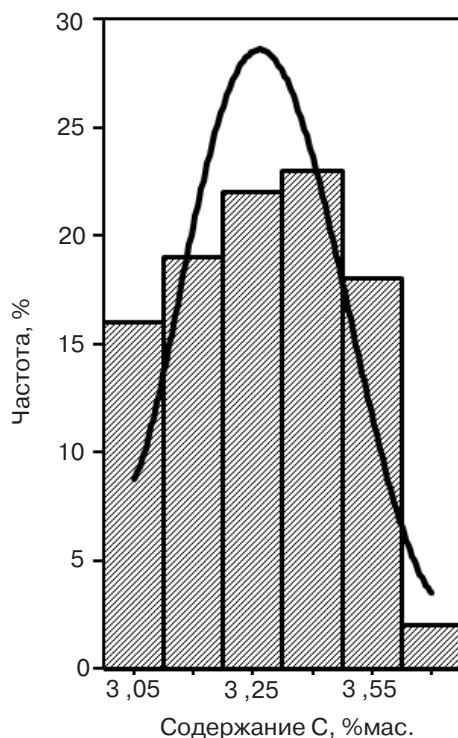


Рис. 1. Гистограммы и кривая нормального распределения содержания углерода

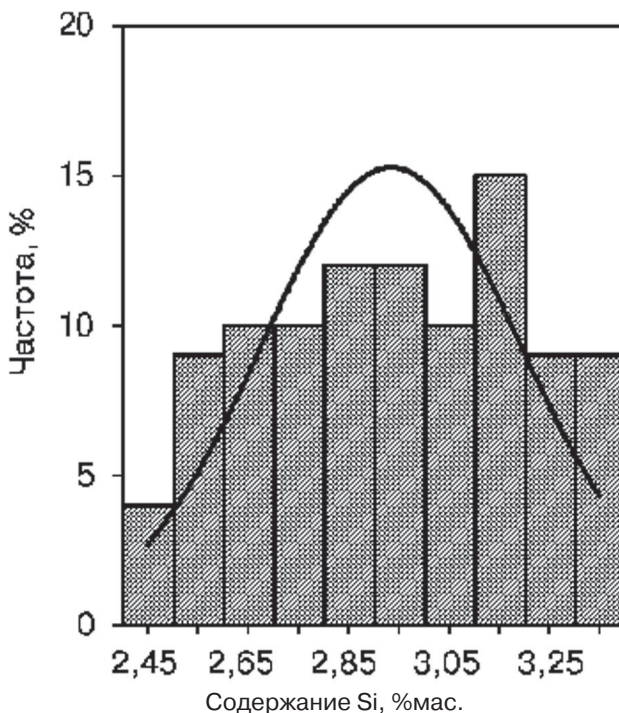


Рис. 2. Гистограммы и кривая нормального распределения содержания кремния

Таким образом, в данной технологии получение высокопрочного чугуна с более узким интервалом варьирования содержания кремния является проблематичным, что в определенной мере ограничивает возможности управления структурообразованием и механическими свойствами отливок.

Марганец относится к карбидообразующим элементам, способствует образованию отбела и перлитизации металлической основы, поэтому при производстве ферритного высокопрочного чугуна его содержание стараются минимизировать.

В рассматриваемом технологическом процессе конечное содержание марганца в отливках определялась применяемыми шихтовыми материалами с учетом угара при плавке (см. табл.).

Из гистограммы эмпирического распределения (рис. 3) следует, что вариации марганца в плавках высокопрочного чугуна характеризуются тесным группированием около центра и имеют незначительное рассеивание, которое вызвано колебаниями его содержания в шихте. Эмпирическое распределение марганца хорошо согласуется с теоретическим. В результате малых значений среднего квадратического отклонения кривая нормального распределения поднимается в центре и очень круто спадает к оси абсцисс при удалении от него. Почти вся площадь под кривой сконцентрирована на небольшом участке вблизи среднего значения содержания марганца.

В 50 % плавков содержание марганца находилась в интервале 0,3-0,4 %.

Таким образом, распределение марганца характеризуется незначительным размахом варьирования и высокой воспроизводимостью результатов, что обеспечивает получение отливок с узкими пределами отклонения содержания марганца от его содержания в шихтовых материалах.

Магний вводится в чугун при сфероидизирующем модифицировании из железо-кремний-магний-кальциевой лигатуры ЖКМК-2Р, которую, как ранее указывали, применяли в трех вариантах дозировки. Из гистограммы эмпирического

распределения (рис. 4) следует, что остаточное содержание магния в рассматриваемой совокупности плавов характеризуется плотным группированием около центра гистограммы с плавным снижением частоты по мере отклонения от центра.

Полученное эмпирическое распределение магния достаточно хорошо согласуется с теоретическим. На величине несовпадения площадей, описанных гистограммой и кривой нормального распределения, несомненно, сказались отмеченные изменения в дозировке модификатора. Проведенный статистический анализ позволяет сделать вывод о стабильном характере процесса сфероидизирующего модифицирования, обеспечивающем высокое усвоение магния.

Сера в технологиях высокопрочного чугуна является крайне нежелательной примесью. Оптимально ее содержание в расплаве перед модифицированием должно быть менее 0,015 %. При большем содержании необходимо проводить десульфурацию расплава или значительно увеличивать расход сфероидизирующего модификатора для нейтрализации демодифицирующего действия избыточной серы путем ее связывания в сульфиды Mg, Ca, PЗМ. С повышением содержания серы в исходном чугуне ухудшается стабильность результатов модифицирования, снижаются пластичность и ударная вязкость высокопрочного чугуна.

В рассматриваемой выборке плавов содержание серы в металле отливок определялась шихтовыми материалами, степенью десульфурации расплава содой и в процессе сфероидизирующего модифицирования. Гистограмма эмпирического распределения серы (рис. 5) свидетельствует, что ее содержание в металле отливок значительно меньше, чем в исходном расплаве, что подтверждает эффективность задействованных в технологии процессов десульфурации. Расчетное среднее содержание серы в высокопрочном чугуне составляет 0,012 %.

Фосфор является вредной примесью. Легкоплавкие соединения фосфора при кристаллизации сосредотачиваются в межкристаллитном (межзеренном) пространстве, ухудшая показатели пластичности и ударной вязкости высокопрочного чугуна. В ферритном высокопрочном чугуне для ходовой части автомобилей, ядерной промышленности, ветряных электростанций и прочего рекомендуемое содержание фосфора не должна превышать 0,05 %.

В анализируемой технологии содержание фосфора в плавках определялась примененными шихтовыми материалами. Согласно гистограмме эмпирического распределения (рис. 6), более, чем в 60 % плавов содержание фосфора составляло 0,08-0,09 %. Расчетное среднее содержание фосфора (0,09 %) объясняется значительным количеством плавов (26 штук) с его содержанием выше указанного значения.

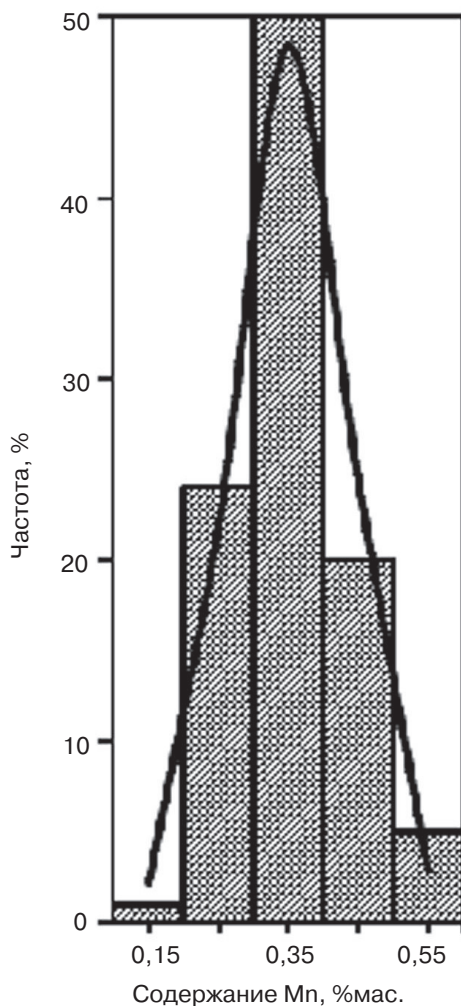


Рис. 3. Гистограммы и кривая нормального распределения содержания марганца

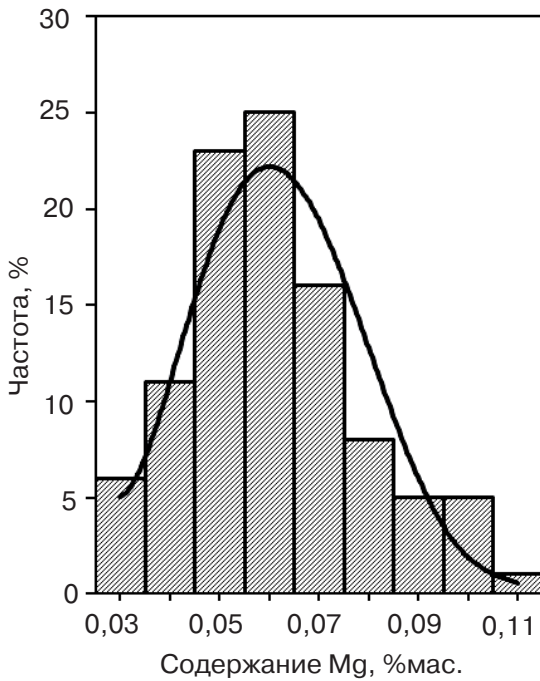


Рис. 4. Гистограммы и кривая нормального распределения содержания магния

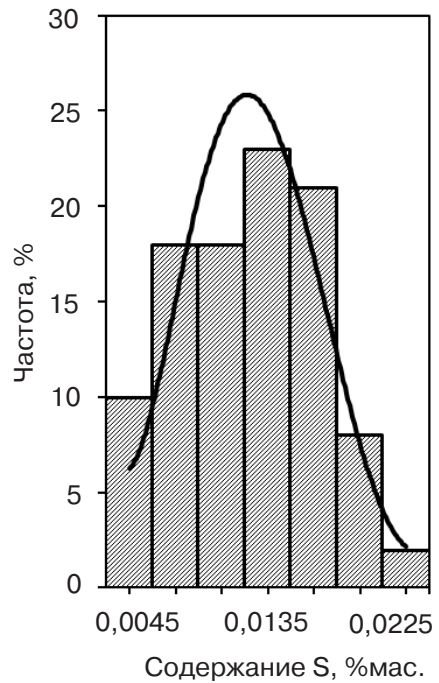


Рис. 5. Гистограммы и кривая нормального распределения содержания серы

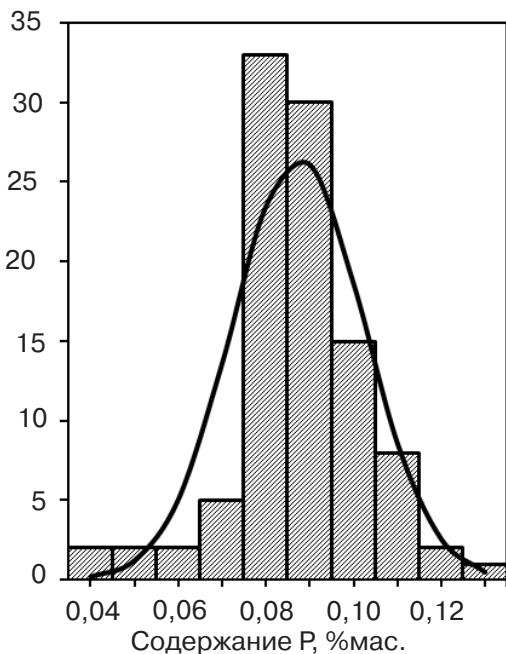


Рис. 6. Гистограммы и кривая нормального распределения содержания фосфора

Выводы

В анализируемой выборке 100 плавок высокопрочного чугуна эмпирическое распределение содержания углерода достаточно хорошо согласуется с теоретическим, что свидетельствует о стабильном характере процессов, вызывающих изменение содержания углерода. Эмпирическое распределение марганца характеризуется тесным группированием около центра, хорошо согласуется с теоретическим, обеспечивая получение отливок с узким диапазоном отклонения содержания марганца от расчетного. Эмпирическое распределение содержания кремния значительно отклоняется от теоретического, то есть имеет место неслучайное рассеивание. Сравнение распределений углерода и кремния, содержания которых в чугуне являются близкими, свидетельствует, что размах варьирования содержания кремния в

2 раза шире, чем углерода. Распределение содержания магния характеризуется плотным группированием около центра гистограммы, достаточно хорошо согласуется с теоретическим, что свидетельствует о стабильном характере процесса сфероидизирующего модифицирования комплексным модификатором ЖКМК-2Р.

Полученные результаты позволяют определить основные направления улучшения качества отливок за счет корректировки ряда технологических параметров и сужения диапазона рассеивания содержания серы, магния, кремния, относящихся к основным факторам управления структурообразованием и механическими свойствами высокопрочного чугуна.



Список литературы

1. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
2. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
3. Волощенко М. В. Получение чугунов с шаровидным графитом при использовании комплексных модификаторов. – Киев: УкрНИИТИ, 1968. – 34 с.
4. Бубликов В. Б. Кальций в высокопрочном чугуне // Процессы литья. – 2007. – № 5. – С. 4-10.



References

1. Smirnov N. V., Dunin-Barkovskiy I. V. (1969) Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki lya tekhnicheskikh prilozheniy [*Course of probability theory and mathematical statistics for technical application*]. Moscow: Nauka, 512 p. [in Russian].
2. Stepnov M. N. (1985) Statisticheskie metody obrabotki rezultatov mekhanicheskikh ispytaniy: Spravochnik [*Statistical methods of mechanical test results processing: Handbook*]. Moscow: Mashinostroenie, 232 p. [in Russian].
3. Voloshchenko M. V. (1968) Poluchenie chugunov s sharovidnym grafitom pri ispolzovanii kompleksnykh modifikatorov [*Obtaining of spheroidal graphite cast iron with using of complex modifiers*]. Kiev: UkrNIINTI, 34 p. [in Russian].
4. Bublikov V. B. (2007) Kaltsiy v vysokoprochnom chugune [*Calcium in ductile cast iron*]. Protsessy litya, no. 5, pp. 4-10. [in Russian].

Поступила 01.03.2017