

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. Распределение структуры и механических свойств высокопрочного чугуна. Сообщение 2.

Приведены данные о параметрах структуры и показателях механических свойств высокопрочного чугуна в литом состоянии и после ферритизирующего отжига для получения марки ВЧ420-12. Определен и проанализирован характер распределения количества перлита, временного сопротивления при разрыве, твердости, относительного удлинения, ударной вязкости в 100 плавках высокопрочного чугуна. Полученные результаты позволяют определить основные направления улучшения механических свойств высокопрочного чугуна за счет корректировки технологии его производства.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, перлит, временное сопротивление при разрыве, твердость, относительное удлинение, ударная вязкость, эмпирическое распределение, кривая Гаусса.

Наведено дані про параметри структури і показники механічних властивостей високоміцного чавуну в литому стані та після феритизуючого відпалу для отримання марки ВЧ420-12. Визначено і проаналізовано характер розподілу кількості перліту, тимчасового опору при розриві, твердості, відносного подовження, ударної в'язкості в 100 плавках високоміцного чавуну. Отримані результати дозволяють визначити основні напрямки поліпшення механічних властивостей високоміцного чавуну за рахунок коригування технології його виробництва.

Ключові слова: високоміцний чавун, перліт, тимчасовий опір при розриві, твердість, відносне подовження, ударна в'язкість, емпіричний розподіл, крива Гауса.

The data on structure parameters and mechanical properties of as-cast and after ferritizing annealing ductile cast iron for obtaining ВЧ420-12 grade are presented. The distribution of pearlite, tensile strength, hardness, elongation, impact toughness in 100 melts of ductile cast iron are defined and analyzed. The obtained results allow to determine the main directions of ductile cast iron mechanical properties improvement by adjusting its production technology.

Keywords: ductile cast iron, pearlite, tensile strength, hardness, elongation, impact toughness, empirical distribution, Gauss curve.

Ранее [1] методами статистического анализа [2, 3] были обработаны результаты химического состава 100 плавок высокопрочного чугуна марки ВЧ420-12. В данной статье представлены результаты металлографических исследований и механических испытаний образцов из этого высокопрочного чугуна (в литом состоянии и после низкотемпературного ферритизирующего отжига), изготовленных из стандартных клиновидных проб с толщиной у основания 25 мм.

Высокопрочный чугун марки ВЧ420-12 относится к ферритному классу. Форма графита в рассматриваемой выборке плавок была шаровидной и соответствовала баллам ШГФ4, ШГФ5. С целью сокращения режима ферритизирующего отжига химический состав чугуна выбран таким образом, чтобы в процессе охлаждения отливок в песчано-глинистых формах получить высокую степень ферритизации металлической основы. В рассматриваемой выборке плавок структура металлической основы была феррито-перлитной в литом состоянии и ферритной после отжига. Структурно-свободный цементит отсутствовал. В связи с тем, что металлическая основа состояла из двух составляющих, рассматривали только распределение перлита.

Количество перлита в литой структуре металлической основы варьировалось от 5 до 50 % при среднем содержании 24,6 %. Полученное эмпирическое распределение хорошо согласуется с теоретическим (рис. 1). Кривая нормального распределения вытянута в центральной части и круто спадает к оси абсцисс. Площади, описанные гистограммой и кривой нормального распределения, отличаются незначительно.

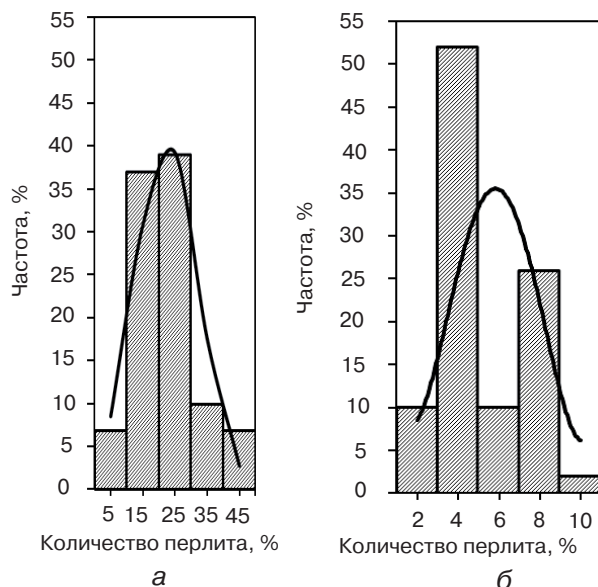


Рис. 1. Гистограммы и кривые нормального распределения количества перлита в металлической основе: а – в литом состоянии; б – после отжига

После отжига количество перлита в металлической основе варьировалось в пределах 1-11 % при расчетном среднем значении 4,9 %. Как следует из гистограммы эмпирического распределения (рис. 1, б), в 62 % плавок содержание перлита было менее 5 %. Гистограмма имеет необычную форму – буквально в ее центре частота падает (до среднего содержания 6 %), а затем возрастает до 8,0 %. Это объясняется недостатками заводской методики определения количества перлита в структуре путем глазомерного сравнения анализируемой структуры с эталонами. Содержание перлита в структуре указывалось в виде интервала, например 15-20 %. Неточность метода, несомненно, сказалась на форме гистограммы, где наблюдается резкое изменение частоты попадания в соседние интервалы.

Несмотря на ступенчатую форму гистограммы, кривая нормального

распределения вытянута в центре и круто спадает к оси абсцисс, что позволяет сделать вывод о незначительном влиянии колебаний технологических параметров на структуру металлической основы высокопрочного чугуна после отжига.

В литом состоянии значения *временного сопротивления при разрыве* σ_B достаточно плотно сгруппированы около центра гистограммы (рис. 2, а). Расчетное среднее значение σ_B составило 525 МПа при варьировании от 470 до 610 МПа. Полученное эмпирическое распределение хорошо согласуется с теоретическим, кривая которого вытянута в центральной части и круто спадает от вершины, постепенно расширяясь по мере приближения к оси абсцисс. Площади, описанные гистограммой и кривой нормального распределения, разнятся незначительно. Статистический анализ свидетельствует, что полученное распределение σ_B в литом состоянии подчиняется нормальному закону.

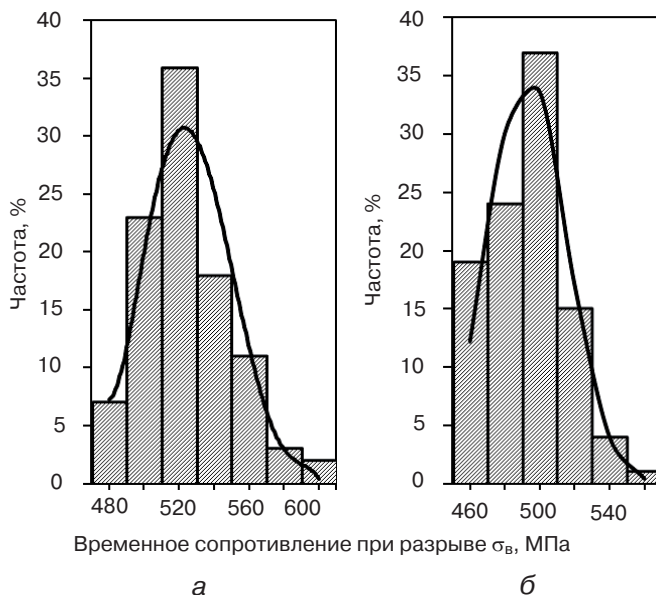


Рис. 2. Гистограммы и кривые нормального распределения временного сопротивления при разрыве высокопрочного чугуна: а – в литом состоянии; б – после отжига

После ферритизирующего отжига диапазон рассеивания σ_B сужается. В 95 % плавков значения σ_B находились в пределах 460-540 МПа. Среднее значение σ_B составило 495 МПа. Действующая технология обеспечивает во всех плавках после отжига получение более высокого значения σ_B , чем предусмотрено в ДСТУ 3925-99 для любой из марок ферритного высокопрочного чугуна. Полученное эмпирическое распределение (рис. 2, б) хорошо согласуется с теоретическим. Значения σ_B тесно сгруппированы около центра гистограммы, что свидетельствует о незначительном рассеивании результатов. Кривая нормального распределения вытянута и круто спадает к краям. Следовательно, вариации технологических параметров мало влияют на сопротивление при разрыве отожженного высокопрочного чугуна.

Твердость HB в литом состоянии варьируется в пределах 150-220 единиц. Расчетное среднее значение составляет 184 HB. Гистограмма эмпирического распределения твердости (рис. 3, а) имеет нехарактерную форму – непосредственно около центра частота уменьшается, а затем увеличивается. Это можно объяснить тем, что вариационный ряд был разделен на интервалы одинаковой длины, а величина твердости, определяемая по таблицам на основании размера отпечатка, не подчиняется линейному закону. В определенной мере на распределение твердости повлияло и несовершенство применяемой на заводе методики измерения диаметра отпечатка

микроскопом. Несмотря на неступенчатую форму гистограммы, кривая нормального распределения указывает, что на твердость высокопрочного чугуна в литом состоянии мало влияют межплавочные колебания технологических параметров.

После отжига твердость снижается незначительно. Длина вариационного ряда уменьшилась только на один интервал – вместо интервалов в литом состоянии 205-215 и 215-225 *HВ* появился интервал 145-155 *HВ*. Среднее значение твердости после отжига составляет 169 *HВ*. Кривая нормального распределения вытянута в центре и круто падает к оси абсцисс (рис. 3, б).

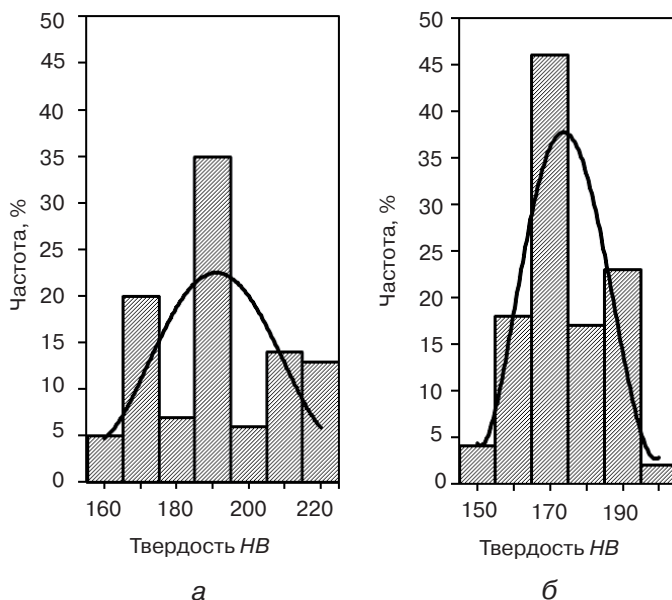


Рис. 3. Гистограммы и кривые нормального распределения твердости: а – в литом состоянии; б – после отжига

Относительное удлинение в литом состоянии варьируется в пределах 8- 20 % при среднем расчетном значении 12,3 % (рис. 4, а). В 30 плавках значение δ составило менее 12, а в 16 плавках – менее 10 %. Следовательно, с учетом распределения временного сопротивления разрыву (рис. 2, а) технологический процесс обеспечивает получение в литом состоянии высокопрочного чугуна марки ВЧ450-5. Кривая нормального распределения δ круто спадает и расширяется по мере приближения к оси абсцисс. Площади, описанные гистограммой и кривой нормального распределения, разнятся незначительно. Таким образом, эмпирическое распределение достаточно хорошо согласуется с нормальным законом.

В результате отжига вариационный ряд δ увеличился на 2 интервала. Среднее относительное удлинение повысилось до 15,7 %. Гистограмма эмпирического распределения после отжига (рис. 4, б) растянута вдоль оси абсцисс и не имеет выраженного центра группирования. Кривая нормального распределения плавно расширяется по мере приближения к оси абсцисс. Принятая технология по показателю пластичности после отжига полностью гарантирует получение ферритного высокопрочного чугуна марки ВЧ450-10 и с вероятностью 97 % – ВЧ420-12.

В литом состоянии *ударная вязкость КС* невысокая и варьируется в пределах 15-70 Дж/см² при среднем значении 32 Дж/см². Полученное эмпирическое распределение значений *КС* достаточно хорошо согласуется с теоретическим (рис. 5, а), кривая которого вытянута в центральной части и круто спадает к оси абсцисс. Это свидетельствует о тесном группировании значений *КС* около центра и незначительном рассеивании результатов испытаний. Следует отметить, что в литом состоянии в 16 % плавках *КС* составляла всего 10-20 Дж/см². На это необходимо обращать вни-

Кристаллизация и структурообразование сплавов

В рассматриваемом производственном процессе формирование ферритной металлической основы и требуемых механических свойств высокопрочного чугуна марки ВЧ420-12 обеспечивается проведением термической обработки. Представленные на рис. 6 кривые нормального распределения позволяют проанализировать влияние ферритизирующего отжига на изменения структуры и механических свойств высокопрочного чугуна.

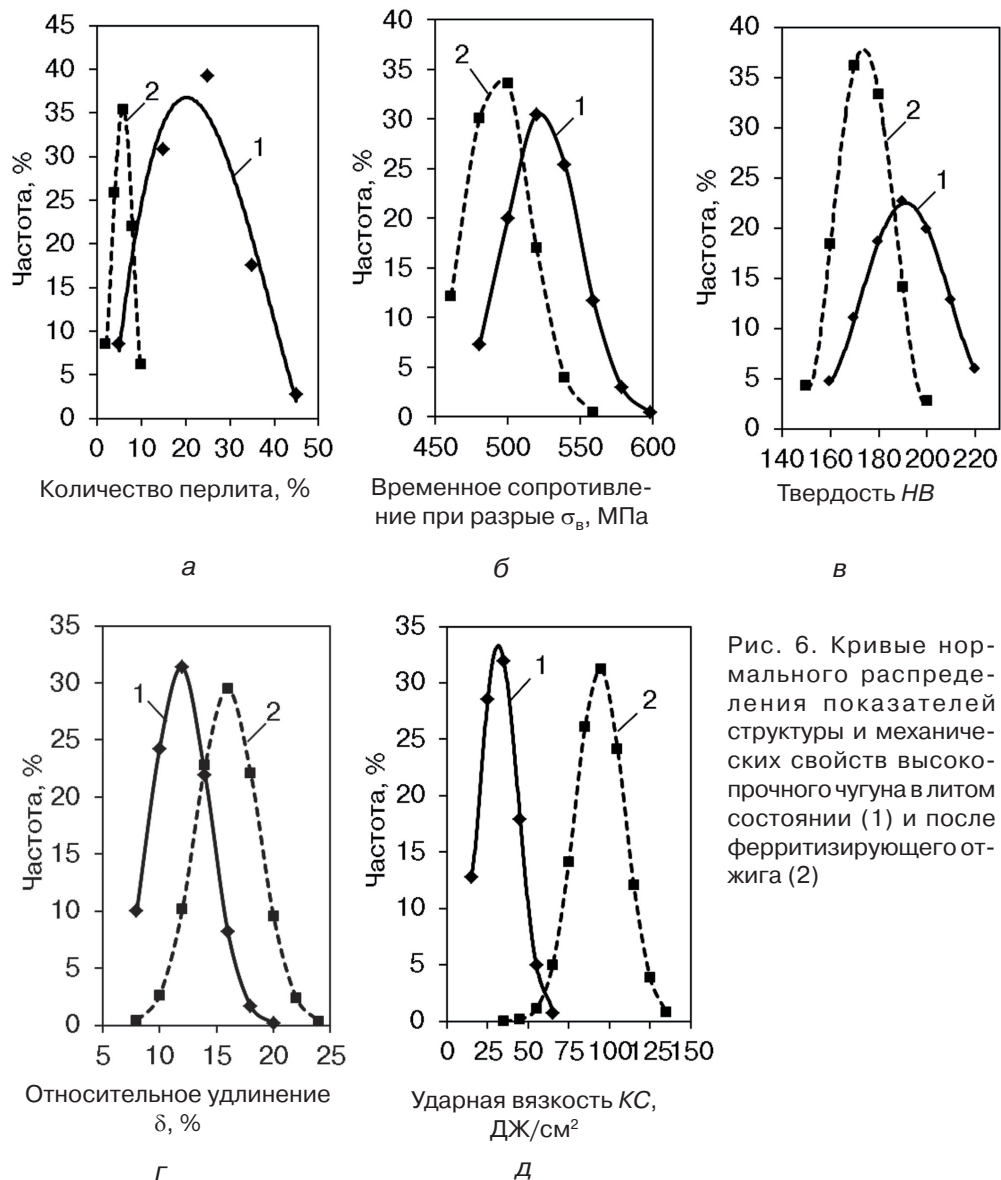


Рис. 6. Кривые нормального распределения показателей структуры и механических свойств высокопрочного чугуна в литом состоянии (1) и после ферритизирующего отжига (2)

После ферритизирующего отжига количество перлита в металлической основе уменьшается в 5 раз. Диапазон рассеивания временного сопротивления при разрыве σ_B сужается на 50 МПа, а среднее значение уменьшается с 525 до 495 МПа. Диапазон рассеивания твердости сужается, кривая нормального распределения вытянута в центре и круто спадает к оси абсцисс. Расчетное среднее значение уменьшается от 184 до 169 HB. Кривая нормального распределения относительного удлинения δ смещается вправо в сторону больших значений. Среднее значение повышается с 12,3 до 15,7 %. В результате отжига наиболее значительно изменяется ударная вязкость

КС. Расчетное среднее значение увеличивается в 2,8 раза – с 32 до 90 Дж/см². При этом значительно расширяется диапазон рассеивания результатов испытаний.

Выводы

Результаты исследования позволяют определить основные направления улучшения механических свойств изделий из высокопрочного чугуна за счет совершенствования технологии производства. Выявленные закономерности распределения механических свойств в плавках высокопрочного чугуна расширяют наши представления об этом прогрессивном конструкционном материале, позволяют более объективно и обосновано решать вопросы его применения.



Список литературы

1. Бубликов В. Б., Бачинский Ю. Д., Нестерук Е. П., Ясинский А. А. 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 // Процессы литья. – 2017. – № 3. – С. 3-11.
2. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
3. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.



References

1. Bublikov V. B., Bachinskiy Yu. D., Nesteruk Ye. P., Yasinskiy A. A. (2017) Issledovanie zakonome-rnostey i optimizatsiya tekhnologicheskikh parametrov proizvodstvennogo protsesssa polucheniya vysokoprochnogo chuguna s primeneniem kompleksnogo modifikatora ZhKMK-2R. Tekhnolog-icheskiy reglament. Kharakter raspredeleniya kontroliruemykh khimicheskikh elementov v plavkakh vysokoprochnogo chuguna. Soobshchenie 1 [Study of laws and technological parameters op-timization in production process of ductile cast iron obtaining with a complex modifier ZhKMK-2R (FeSiMgCa-2RE). The technological regulations. The character of controlled chemical elements distribution in ductile cast iron melts. Message]. Protsessy litya, 2017, №3, pp. 3-11.
2. Smirnov N. V., Dunin-Barkovskij I. V. (1969). Kurs teorii veroyatnostej i matematicheskoy statistiki dlja tehnicheskikh prilozhenij. [Course of probability theory and mathematical statistics for techni-cal applications]. Moscow: Nauka. [in Russian].
3. Stepnov M. N. (1985). Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mehanicheskikh ispytaniy: Spravochnik. [Statistical methods of mechanical test results processing: Handbook]. Moscow: Mashinostroenie. [in Russian].

Поступила 29.03.2017