

---

# КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ СПЛАВОВ

УДК 669.162.275

**В. Б. Бубликов**, д-р техн. наук, зав отделом, e-mail:otdel.vch@gmail.com

**Ю. Д. Бачинский**, мл. науч. сотр.

**Е. П. Нестерук**, канд. техн. наук, науч. сотр.

**А. А. Ясинский**, науч. сотр.

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. Влияние основных технологических факторов производственного процесса на механические свойства высокопрочного чугуна. Сообщение 3

*Представлены результаты влияния основных технологических факторов на механические свойства высокопрочного чугуна марки ВЧ 420-12. Проанализирован характер распределения содержания химических элементов, количества перлита в структуре металлической основы и механических свойств в 100 плавках высокопрочного чугуна. Установлено, что к основным факторам, влияющим на величину показателей механических свойств, относятся качество исходного расплава, определяемое применяемыми шихтовыми материалами, расход комплексного модификатора, химический состав высокопрочного чугуна и термическая обработка.*

**Ключевые слова:** высокопрочный чугун, химический состав, количество перлита, расход модификатора, термическая обработка, механические свойства.

*Представлено результати впливу основних технологічних факторів на механічні властивості високоміцного чавуну марки ВЧ 420-12. Проаналізовано характер розподілу вмісту хімічних елементів, кількості перліту в структурі металевої основи та механічних властивостей в 100 плавках високоміцного чавуну. Встановлено, що до основних факторів, котрі впливають на величину показників механічних властивостей, відносяться якість вихідного розплаву, яка визначається шихтовими матеріалами, що застосовувалися, витрата комплексного модифікатора, хімічний склад високоміцного чавуну і термічна обробка.*

**Ключові слова:** високоміцний чавун, хімічний склад, кількість перліту, витрата модифікатора, термічна обробка, механічні властивості.

*The results of basic technological factors effect on ductile cast iron grade ВЧ420-12 mechanical properties are presented. The nature of chemical elements distribution, the pearlite amount in the metallic base structure and mechanical properties in 100 melts of ductile cast iron are analyzed. It is*

*established that the main factors affecting the mechanical properties values are initial melt quality, defined by applied charge materials, complex modifier consumption, ductile cast iron chemical composition and heat treatment.*

**Keywords:** ductile cast iron, chemical composition, pearlite amount, modifier consumption, heat treatment, mechanical properties.

Ранее [1, 2] с помощью методов статистического анализа была проведена обработка результатов химических анализов, металлографических исследований и механических испытаний образцов из высокопрочного чугуна (в литом состоянии и после низкотемпературного ферритизирующего отжига). В данной статье рассматриваются закономерности влияния технологических факторов и структуры металлической основы на показатели механических свойств высокопрочного чугуна ВЧ 420-12.

К основным технологическим факторам, определяющим механические свойства высокопрочного чугуна, относятся: качество исходного расплава (в рассматриваемой технологии плавки определялось, главным образом, применяемыми шихтовыми материалами); модифицирование (изменялся расход комплексного модификатора ЖКМК-2Р); колебание содержания основных химических элементов (углерода, кремния, марганца); термическая обработка (ферритизирующий отжиг). Наряду с указанными технологическими факторами на механические свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом также влияет структура его металлической основы, которая характеризуется количеством перлита в литой феррито-перлитной или в преимущественно ферритной металлической основе после отжига. Рассмотрим выявленные закономерности влияния указанных технологических факторов и структуры металлической основы на показатели механических свойств высокопрочного чугуна.

В анализируемой выборке плавок использовали чушковые доменные чугуны двух металлургических заводов А и Б, а также собственный возврат высокопрочного чугуна (таблица). При проведении плавок применяли четыре состава шихты, для каждого из которых были определены среднее количество перлита в структуре металлической основы и средние значения показателей механических свойств высокопрочного чугуна в литом и отожженном состояниях.

### Химический состав компонентов шихты промышленных плавок

Компонент шихты (производитель)	Содержание элемента, %					Количество в шихте, %			
	C	Si	Mn	P	S	I	II	III	IV
Чугун передельный П2 (А)	4,32	0,47	0,25	0,05	0,016	50–80	50–55	60–80	55–60
Чугун литейный Л5 (А)	4,34	1,56	0,33	0,08	0,03	20–50	–	–	–
Чугун литейный Л4 (А)	4,11	2,12	0,27	0,08	0,02	–	15–20	–	–
Чугун литейный Л4 (Б)	3,99	2,05	0,67	0,09	0,03	–	–	20–40	–
Чугун литейный Л3 (Б)	3,85	2,65	0,65	0,08	0,02	–	–	–	10–15
Возврат высокопрочного чугуна	3,30	3,00	0,35	0,08	0,015	–	30	–	30

Влияние состава шихты на механические свойства высокопрочного чугуна представлено на рис. 1. В литом состоянии временное сопротивление разрыву  $\sigma_B$  мало зависит от шихтовки и несколько увеличивается при вводе в состав шихты возврата высокопрочного чугуна. Максимальное значение твердости  $HB$  в литом состоянии получено на составе шихты III в результате дополнительного легирования метал-

## Кристаллизация и структурообразование сплавов

лической матрицы высокопрочного чугуна марганцем из чугунов завода Б. Состав шихты оказывает существенное влияние на относительное удлинение  $\delta$ : если для состава I среднее значение  $\delta = 11$ , то для III –  $\delta = 13,3$  %. Снижение пластичности для составов шихты II и IV можно объяснить применением значительного количества возврата высокопрочного чугуна, полученного на шихте состава I. Величины ударной вязкости  $KC$  в литом состоянии для разных составов шихты отличаются незначительно, но при составах шихты III и IV они несколько увеличиваются.

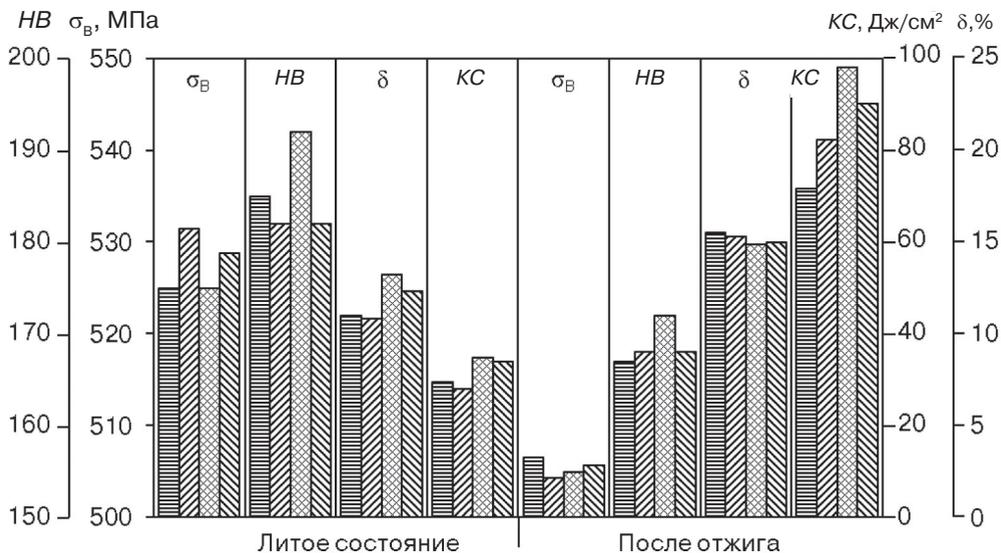


Рис. 1. Механические свойства высокопрочного чугуна в зависимости от состава шихты:   
 – шихта I;   
 – шихта II;   
 – шихта III;   
 – шихта IV.

В результате отжига влияние различных составов шихты на временное сопротивление разрыву  $\sigma_B$  нивелируется. Твердость  $HB$  увеличивается с повышением содержания марганца. Показатель пластичности  $\delta$  в результате отжига существенно возрастает, причем отличие значений для различных составов шихты незначительно и объясняется разбросом результатов испытаний. Наиболее значительно состав шихты влияет на ударную вязкость – самые низкие значения  $KC$  получены для состава I. Ввод в шихту 30 % возврата высокопрочного чугуна (II состав) увеличивает  $KC$  на 15 %. Использование состава III шихты повышает ударную вязкость после отжига на 37 %. Небольшое снижение ударной вязкости в случае состава IV происходит по тем же причинам, что и снижение относительного удлинения в литом состоянии.

Как известно, комплексные модификаторы типа ЖКМК обладают высокой рафинирующей способностью. Наиболее воспроизводимыми показателями рафинирующего действия комплексного модификатора являются его расход и содержание в чугуне остаточного магния. На рис. 2, а представлены зависимости средних значений показателей механических свойств отожженного высокопрочного чугуна от содержания остаточного магния. Характер полученных зависимостей видимо объясняется в меньшей мере влиянием магния и в большей мере влиянием кальция и кремния, которые вводятся в чугун одновременно с магнием из комплексного модификатора.

Кальций эффективно нейтрализует негативное влияние серы и кислорода, находящихся в расплаве, способствуя повышению пластичности и ударной вязкости высокопрочного чугуна.

Известно, что кремний до определенного содержания способствует графитизации, уменьшая количество остаточного перлита. Дальнейшее увеличение содержания кремния повышает степень легирования феррита, что приводит к росту прочности высокопрочного чугуна. Наиболее контрастно влияние модифицирования

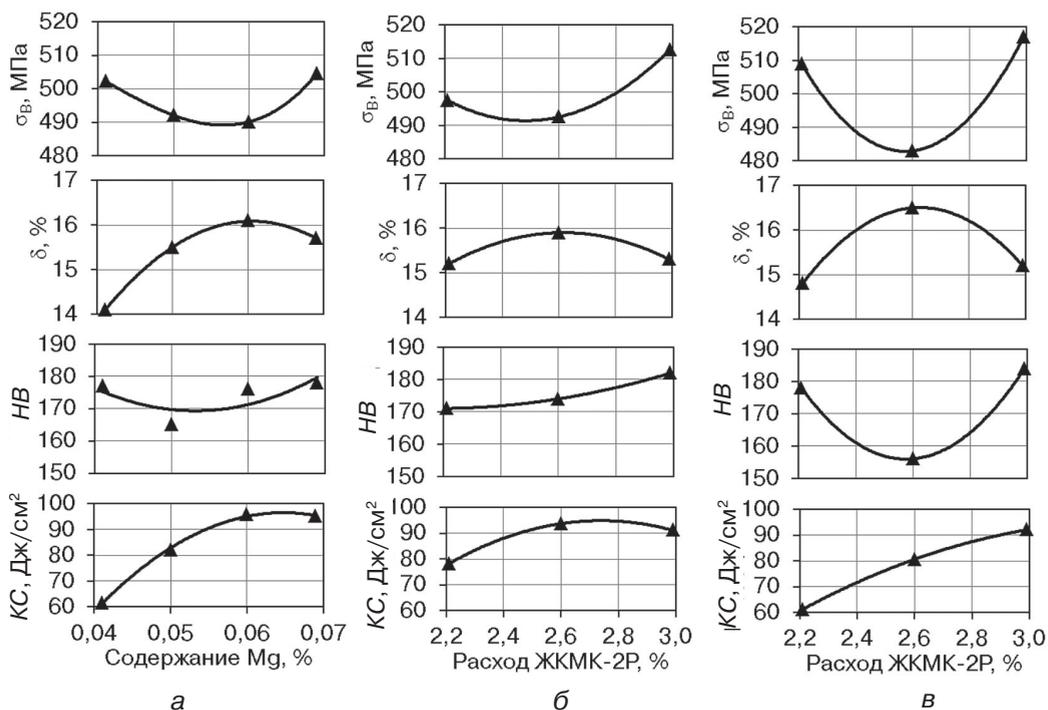


Рис. 2. Изменение механических свойств высокопрочного чугуна после отжига в зависимости от: а – содержания остаточного магния; б – расхода комплексного модификатора (все составы шихты); в – расхода ЖКМК-2Р (для шихты состава I)

ЖКМК-2Р проявляется на показателе ударной вязкости  $КС$ , который с увеличением содержания остаточного магния значительно повышается. При рассмотрении показателей механических свойств всей совокупности плавков как функции от расхода ЖКМК-2Р (рис. 2, б) следует, что они имеют аналогичный характер. Влияние рафинирования комплексным модификатором наиболее контрастно проявляется на плавках из шихты состава I, состоящей из передельного и литейного чугунов завода А (рис. 2, в). При увеличении расхода ЖКМК-2Р от 2,2 до 2,6 % показатели временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$  и твердости  $НВ$  снижаются, а пластичности  $\delta$  и ударной вязкости  $КС$  повышаются. Дальнейшее увеличение расхода до 3,0 % увеличивает временное сопротивление разрыву  $\sigma_B$ , твердость  $НВ$  и ударную вязкость  $КС$ , но снижает пластичность  $\delta$ .

Особенно эффективно в данной выборке плавков расход комплексного модификатора влияет на ударную вязкость. Так, при расходе 2,2 % ЖКМК-2Р, которого достаточно для полной сфероидизации графита, среднее значение  $КС$  составляет 61,3 Дж/см<sup>2</sup>. Повышение расхода до 2,6 % увеличивает ударную вязкость на 25 %, а при расходе 3,0 % – на 45 %. В последнем случае среднее значение ударной вязкости высокопрочного чугуна из шихты состава I достигает 92,1 Дж/см<sup>2</sup>, то есть практически тех же значений, что и при оптимальном для механических свойств составе шихты III (см. рис. 1).

Таким образом, установлено, что в результате высокой рафинирующей способности комплексного модификатора ЖКМК-2Р, в значительной мере, нейтрализуется отрицательное действие наследственности чушковых чугунов завода А, что позволяет значительно повысить ударную вязкость высокопрочного чугуна.

В значительной мере механические свойства высокопрочного чугуна определяются содержанием в нем углерода, кремния и марганца. Для исследования влияния этих элементов размах их варьирования в анализируемых плавках был разделен

на три интервала. После группирования плавок по интервалам для каждого из них были определены средние показатели механических свойств в литом и отожженном состояниях. Полученные таким образом зависимости представлены на рис. 3.

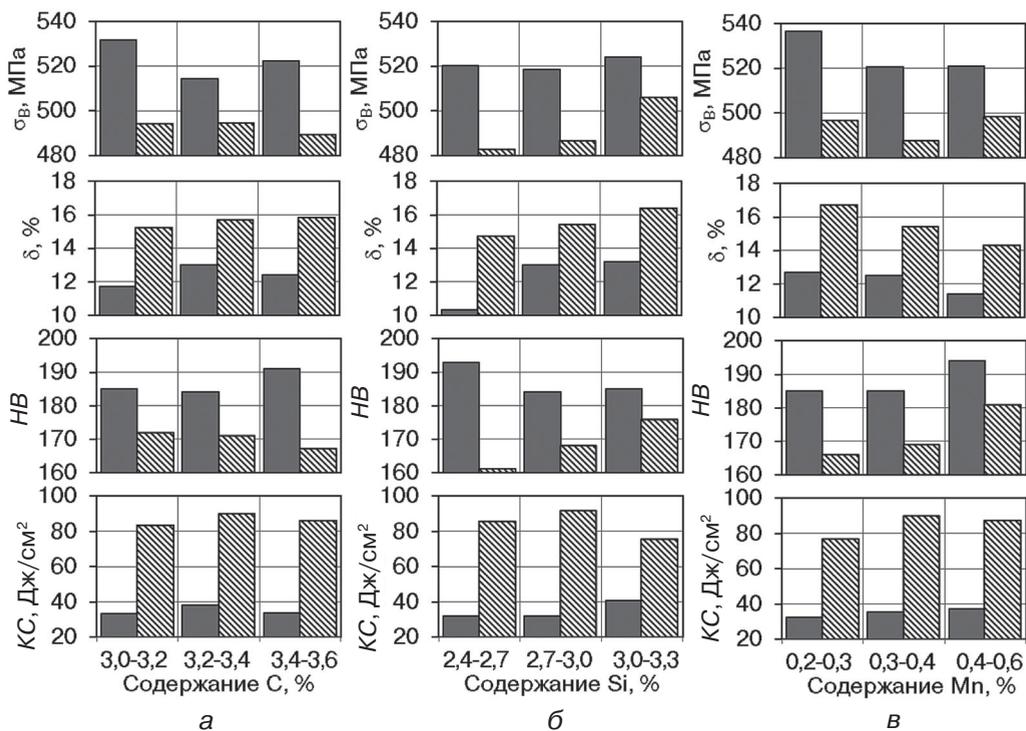


Рис. 3. Влияние содержания углерода (а), кремния (б) и марганца (в) на механические свойства высокопрочного чугуна:  – литое состояние;  – после отжига

**Углерод.** Как ранее отмечалось, распределение углерода объясняется не только случайным рассеиванием результатов, но и различным его содержанием в применяемых шихтовых материалах. Установленные соотношения между содержанием углерода и механическими свойствами высокопрочного чугуна несколько отличаются от известных в результате наложения влияния наследственных свойств шихтовых материалов, различающихся содержанием углерода. Наблюдаемое (рис. 3, а) при высоком содержании углерода увеличение в литом состоянии временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$  и твердости  $HВ$ , а также снижение относительного удлинения  $\delta$  и ударной вязкости  $КС$  объясняется наследственными свойствами чушковых чугунов завода А, которые характеризуются высоким содержанием углерода.

В отожженном высокопрочном чугуне влияние наследственных свойств шихтовых материалов, в значительной мере, нивелируется, и полученные данные согласуются с известными в литературе.

**Кремний.** В рассматриваемых пределах кремний практически не влияет на временное сопротивление разрыву  $\sigma_B$  в литом состоянии. Твердость  $HВ$  снижается при увеличении содержания кремния до 3 % и несколько возрастает при дальнейшем его повышении. Значения относительного удлинения  $\delta$  и ударной вязкости  $КС$  увеличиваются с ростом содержания кремния.

После отжига с повышением содержания кремния наблюдается увеличение значений временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$ , твердости  $HВ$  и пластичности  $\delta$ . Ударная вязкость  $КС$  вначале несколько повышается и в дальнейшем снижается в результате легирования феррита кремнием, влияние которого проявляется четко независимо от применяемых шихтовых материалов.

*Марганец.* Содержание марганца определялось не только случайным разбросом результатов, но и применяемыми чушковыми чугунами. Наибольшее содержание марганца (0,4–0,6 %) в плавках с применением шихты составов III и IV.

В литом состоянии с увеличением содержания марганца повышается твердость *НВ* и снижается пластичность  $\delta$ , что соответствует природе его влияния. В то же время при незначительном увеличении марганца снижается прочность и несколько увеличивается ударная вязкость, что объясняется более выраженным влиянием на эти показатели наследственных свойств чушковых чугунов по сравнению с непосредственным влиянием увеличения содержания марганца.

В отожженном чугуне влияние наследственных свойств шихтовых материалов сглаживается, в результате чего влияние марганца на временное сопротивление разрыву  $\sigma_B$ , твердость *НВ* и пластичность  $\delta$  соответствует литературным данным. Однако ударная вязкость *КС* аномально увеличивается с повышением содержания марганца, что объясняется большей степенью зависимости этого показателя от наследственных свойств чугуна, чем от изменения содержания марганца.

По форме графит в структуре высокопрочного чугуна всех плавков соответствовал баллам ШГф 4, 5, то есть был шаровидным или близким к нему. Размеры и распределение графита также изменялись незначительно. На основании этого можно сделать заключение о незначительном влиянии графита на механические свойства высокопрочного чугуна анализируемых плавков.

Принимая во внимание, что металлическая основа в литом состоянии была феррито-перлитной, а после отжига – ферритной, ее характеризовали количеством перлита. Рассматриваемые плавки в зависимости от содержания перлита классифицировали на три группы, для каждой из которых определено среднее значение показателей механических свойств (рис. 4). В литом состоянии при содержании перлита до 30 % значения временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$  и твердости *НВ* изменяются незначительно, при дальнейшем увеличении количества перлита эти показатели значительно возрастают. С увеличением количества перлита показатели пластичности  $\delta$  и ударной вязкости *КС* уменьшаются.

После отжига плавки также были классифицированы на 3 группы по количеству остаточного перлита – менее 5; 5–7; более 7 %. При содержании перлита до 7 % значения временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$  и твердости *НВ* изменяются незначительно, при дальнейшем увеличении количества перлита эти показатели возрастают. Значение относительного удлинения снижается по мере увеличения содержания перлита до 7 % и стабилизируется при последующем увеличении его количества. Значения ударной вязкости *КС* высокопрочного чугуна после отжига малочувствительны к вариациям содержания перлита в рассматриваемых пределах.

На основе результатов исследования определены основные направления улучшения качества и повышения механических свойств изделий из высокопрочного чугуна:

- следует отказаться от поставок чушковых чугунов с металлургического завода А, применение которых негативно влияет на показатели относительного удлинения и ударной вязкости высокопрочного чугуна. В шихте наряду с возвратом высокопрочного чугуна рекомендуется использовать чушковые чугуны завода Б с содержанием серы менее 0,02 и марганца менее 0,5 %. При содержании в расплаве перед выпуском из печи менее 0,02 % серы можно значительно улучшить экологическую составляющую, отказавшись от проведения операции десульфурации содой, которая сопровождается выделением большого количества дыма, и уменьшить расход комплексного модификатора ЖКМК-2Р до уровня 2,2 % от массы жидкого металла в ковше;

- применить высокоэффективное графитизирующее внутриформенное модифицирование, которое, по сравнению с модифицирующей обработкой методом ввода на зеркало металла в ковш 75%-ного ферросилиция в количестве 0,6 %, обеспечит снижение расхода графитизирующего модификатора в 2–3 раза при одновременном повышении степени графитизации и инокуляции структуры, улучшении характера

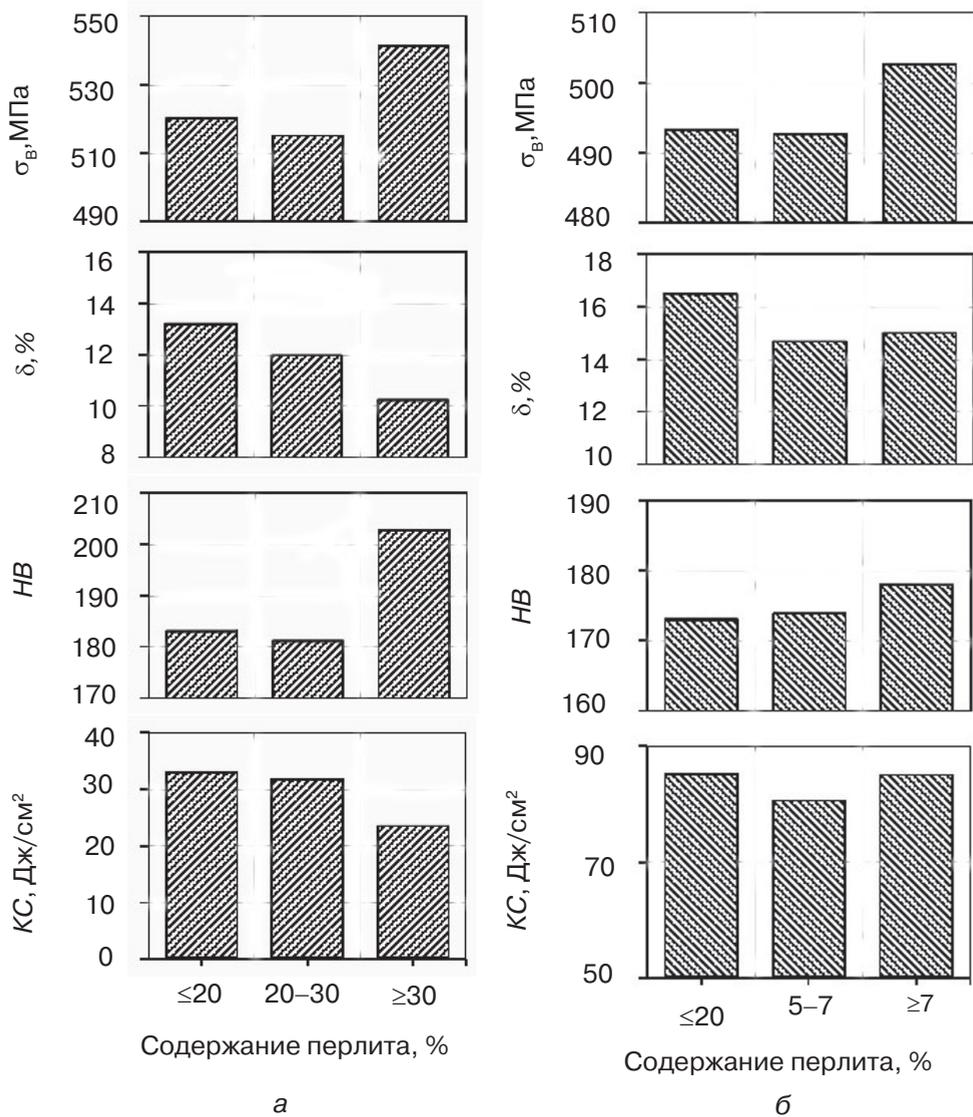


Рис. 4. Влияние количества перлита в литом состоянии (а) и после отжига (б) на механические свойства высокопрочного чугуна

распределения содержания кремния, перлита, показателей относительного удлинения и ударной вязкости высокопрочного чугуна;

– уменьшить диапазон варьирования содержания кремния в плавках высокопрочного чугуна с фактического 2,4–3,4 % до более оптимального 2,7–3,3 % за счет фиксации расхода комплексного модификатора ЖКМК-2Р на одном уровне (2,2 % от массы обрабатываемого расплава) и применения высокоэффективного графитизирующего внутриформенного модифицирования.

### Выводы

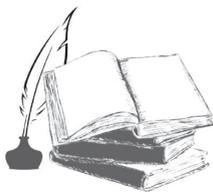
С применением методов статистического анализа установлены основные закономерности производственного процесса получения высокопрочного чугуна с применением комплексного модификатора ЖКМК-2Р. Проанализирован характер распределения содержания химических элементов, количества перлита в структуре металлической основы и механических свойств в 100 плавках высокопрочного чугуна. Установлено, что к основным факторам, определяющим величину показателей механических свойств, относятся качество исходного расплава, определяемое

применяемыми шихтовыми материалами, расход комплексного модификатора, химический состав высокопрочного чугуна, термическая обработка. На основе проведенного исследования определены основные направления оптимизации действующей технологии, улучшения качества и повышения механических свойств изделий из высокопрочного чугуна.



### 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. 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. Распределение структуры и механических свойств высокопрочного чугуна. Сообщение 2 // Процессы литья. – 2017. – № 4. – С. 12–18.



### References

1. Bublikov, V. B., Bachinskiy, Yu. D., Nesteruk, Ye. P., Yasinskiy, A. A. (2017) Issledovanie zakonornostey i optimizatsiya tekhnologicheskikh parametrov proizvodstvennogo protsessa polucheniya vysokoprochnogo chuguna s primeneniem kompleksnogo modifikatora ZhKMK-2R. Tekhnologicheskiiy reglament. Kharakter raspredeleniya kontroliruemykh khimicheskikh elementov v plavkakh vysokoprochnogo chuguna. Soobshchenie 1 [Study of laws and technological parameters optimization 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 1]. Protsessy litya, no. 3, pp. 3–11. [in Russian].
2. Bublikov, V. B., Bachinskiy, Yu. D., Nesteruk, Ye. P., Yasinskiy, A. A. Issledovanie zakonornostey i optimizatsiya tekhnologicheskikh parametrov proizvodstvennogo protsessa polucheniya vysokoprochnogo chuguna s primeneniem kompleksnogo modifikatora ZhKMK-2R. Raspredelenie struktury i mekhanicheskikh svoystv vysokoprochnogo chuguna. Soobshchenie 2 [Study of laws and technological parameters optimization in production process of ductile cast iron obtaining with a complex modifier ZhKMK-2R (FeSiMgCa-2RE). ductile cast iron structure and mechanical properties distribution. Message 2]. Protsessy litya, no. 4, pp. 12–18. [in Russian].

Поступила 23.03.2017