

УДК 621.74

Щенникова В.А., Феоктистов Н.А., Бойко А.Б., Троянов А.В., Сулицин А.В., Эпова И.А.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ГРАФИТОВУЮ ФАЗУ И ТВЕРДОСТЬ ВАЛКОВОГО ЧУГУНА

Аннотация. В статье рассмотрены процессы графитизации валкового чугуна и влияние химического состава на морфологию графитовой фазы и его твердость. Исследовано влияние ванадия и молибдена на выделение графитовой фазы при концентрации ванадия и молибдена. Получены уравнения регрессии влияния химического состава относительно значения твердости. Вместе с тем оценено влияние параметров производства и получены уравнения регрессии твердости и содержания графитовой фазы в рабочем слое прокатного вала с помощью метода нормального уравнения. Дополнительно проведены расчеты для выявления значимых коэффициентов уравнения регрессии. Полученные результаты имеют практическое значение для металлургической промышленности, так как позволяют целенаправленно управлять свойствами валкового чугуна путем корректировки химического состава и технологических параметров производства.

Ключевые слова: индифинитный чугун, полнофакторный эксперимент, прокатные валки, уравнение регрессии, твердость, графит

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений интенсификации производства является сокращение числа перевалок прокатных валков. При этом имеется некоторый запас по стойкости валков первых чистовых клетей и лимитирующим фактором являются валки финишных клетей из индифинитного чугуна. В направлении повышения их стойкости со стороны прокатных цехов имеется высокая заинтересованность.

Прокатные валки из индифинитного чугуна на сегодняшний день являются самым массовым инструментом прокатного стана. Первым поколением данных валков являлась двухслойная заливка металла в стационарную форму. Данным методом изготавливались прокатные валки начиная с 80-х годов прошлого века, универсальность и простота технологии позволяет и по сей день получать некоторые виды валков методом статического литья. Следующим поколением явилось использование метода центробежного литья, позволившим получить более мелкозернистую структуру и возможность значительно повысить твердость и износостойкость рабочего слоя. На сегодняшний день вследствие высоких требований к качеству поверхности и износостойкости на широкополосных станах горячей прокатки применяются только центробежнолитые валки.

На износостойкость влияет множество факторов, один из них это графит. В настоящее время проведены исследования выделения графита в литейных сплавах, которые позволяют оценить влияние химического состава на его морфологию. При производстве прокатных валков помимо химического состава имеется еще и технологический фактор – изотермическая выдержка рабочего слоя в процессе заливки металла в сердцевину. Поэтому это исследование совокупности химического состава, а также параметров изотермической выдержки на морфологию графито-

вой фазы при заливке сердцевины является актуальной задачей.

Цель работы – определение влияния легирующих элементов на характеристики валкового чугуна.

Методы и методика проведения эксперимента

Выплавку опытных сплавов производили в литейной лаборатории кафедры литейных процессов и материаловедения Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова в индукционной плавильной тигельной печи ИЧТ-0002 с шамотной футеровкой ёмкостью 2 кг с извлекаемым тиглем.

В качестве шихтовых материалов при выплавке использовались следующие материалы: Чугун литейный – ГОСТ 4832-95, Лом стальной – ГОСТ 2787-2019, Ферросилиций – ГОСТ 1415-93 (ISO 5445-80), ФС90; Ферромарганец ФМн90(РА) – ГОСТ 4755-91 (ISO 5446-80), Феррохром ФХ001А – ГОСТ 4757-91 (ISO 5448-81), Ферромolibден ФМо60(нк) – ГОСТ 4759-91 (ISO 5452-80), Феррованадий FeV40 – ГОСТ 17293-93 (ISO 5450-80), Никель НЗ – ГОСТ 849-97, Ферровольфрам ФВ72 – ГОСТ 17293-93 (ISO 5450-80), Ферросиликомарганец – ГОСТ 4756-91 (ISO 5447-80), Феррониобий ФН660 – ГОСТ 16773-2003 (ISO 5453-80).

После выплавки опытных сплавов проводили модифицирование расплава в тигле с помощью «колокольчика» и заливку его в форму. Модификатор СФЕРОМАКС 9104 марки FeSiMg910Ba4 ГОСТ2138-91.

Разливка расплава производилась в подготовленные просушенные и подогретые в камерном сушиле песчаные формы. С целью оценки влияния скорости кристаллизации на формирование структуры материала форма отливки выполнена трехступенчатой с толщиной сечения 30, 20 и 10 мм (рис. 1). Каждая отливка разрезана на три пробы различных сечений.

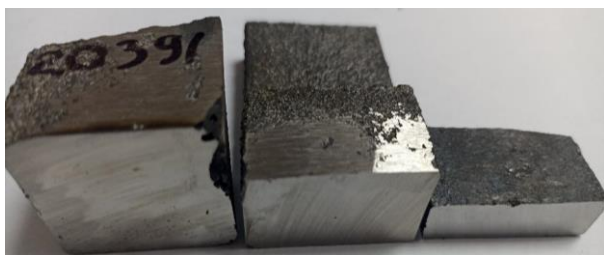


Рис. 1. Пробы от различных сечений трехступенчатой отливки

Определение твердости производилось на стационарном твердомере ERGOTEST COMP 25, метод испытаний согласно ГОСТ 9013-59.

Температуру заливки сплавов определяли при помощи термоизмерителя модели ТЦП-1800В, который предназначен для измерения температуры расплава металлов при помощи термопреобразователя из вольфрам-рениевых сплавов (BP5/20; ГОСТ Р 8.585.2001).

Определение предела прочности на растяжение (временного сопротивления) осуществлялось в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».

Определение предела прочности на изгиб осуществлялось в соответствии с ГОСТ 14019-2003 «Металлы. Методы испытаний на изгиб». Испытания на механические свойства проводили в лабораториях ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Микроструктура образцов изучалась на микрошлифе с использованием инвертированного металлографического микроскопа GX-71 до и после травления в 4%-м спиртовом растворе HNO_3 при увеличении $100\times$, $500\times$ согласно ГОСТ 3443-87.

Построение математических моделей проводили по стандартным методикам и с использованием стандартных пакетов электронных таблиц программы «EXCEL».

Результаты и обсуждения

Для исследования влияния различных факторов на твердость и параметры структуры прокатных валков в лабораторных условиях были проведены четыре плавки металла рабочего слоя из индефинитного чугуна (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав индефинитного чугуна

Марка чугуна	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ni и W
ICDP	2,6-3,4	0,7-1,5	0,5-1,2	0,6-2,0	2,5-5,0	0,2-0,8	до 0,2	до 0,3

Для индефинитного чугуна составим матрицу планирования полного факторного эксперимента (табл. 2). В ходе работы оценивается влияние ванадия (x_1) и молибдена (x_2).

Таблица 2

Исходная матрица планирования полного факторного эксперимента

№ п/п	Изучаемые факторы				Результаты опытов		
	x_1	V	x_2	Mo	y_1	y_2	y_3
1	+	0,56	+	0,53	45,7	46,3	48,7
2	-	0,20	+	0,60	45,7	43,7	42,7
3	+	0,60	-	0,20	43,2	46,2	45,8
4	-	0,27	-	0,26	44,4	45,6	45,6
5	0	0,4	0	0,4	44,75	45,45	45,7

Для каждого фактора принимаем основной уровень, интервал варьирования и зависимость кодированной переменной от натуральной (табл. 3).

Таблица 3

Кодирование факторов

Факторы	Нижний уровень	Верхний уровень	Основной уровень	Интервал варьирования
z_1	0,2	0,6	0,4	0,2
z_2	0,2	0,6	0,4	0,2

Считаем средние выборочные результатов твердости для каждого эксперимента и строим матрицу планирования (табл. 4) с учетом всех взаимодействий и средних значений отклика.

Таблица 4

Матрица планирования для обработки результатов полного факторного эксперимента

№ п/п	Факторы				Взаимодействия	Результаты опытов			Среднее результатов
	x_1	V	x_2	Mo		y_1	y_2	y_3	
1	+	0,56	+	0,53	+	45,7	46,3	48,7	46,89
2	-	0,20	+	0,60	-	45,7	43,7	42,7	44,00
3	+	0,60	-	0,20	-	43,2	46,2	45,8	45,07
4	-	0,27	-	0,26	+	44,4	45,6	45,6	45,20
5	0	0,4	0	0,4	0	44,75	45,45	45,7	45,30

Вычисляем коэффициенты уравнения регрессии относительно значений твердости и находим дисперсию воспроизводимости (табл. 5).

Таблица 5

Расчет дисперсии

№ п/п	1			2	3	4	5	6
	$y_{тв1}$	$y_{тв2}$	$y_{тв3}$	$y_{твj}$	$(y_{твj1} - \overline{y_{твj}})^2$	$(y_{твj2} - \overline{y_{твj}})^2$	$(y_{твj3} - \overline{y_{твj}})^2$	$S_{твj}^2$
1	45,7	46,3	48,7	46,89	1,49	0,31	3,16	1,65
2	45,7	43,7	42,7	44,00	2,78	0,11	1,78	1,46
3	43,2	46,2	45,8	45,07	3,48	1,28	0,54	1,77
4	44,4	45,6	45,6	45,20	0,64	0,16	0,16	0,32
5	44,75	45,45	45,7	45,30	0,30	0,02	0,16	0,24

Суммируя элементы столбца 6 табл. 5, получаем

$$\sum_{j=1}^4 S_{твj}^2 = 5,2988. \quad (1)$$

Отсюда получаем дисперсию воспроизводимости:

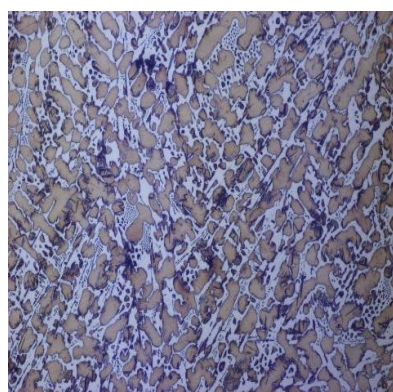
$$S_{\{тву\}}^2 = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 S_j^2 = \frac{5,2988}{4} = 1,325. \quad (2)$$

Определяем среднее квадратическое отклонение коэффициентов:

$$S_{\{тву\}} = \sqrt{\frac{S_{\{тву\}}^2}{n \cdot m}} = \sqrt{\frac{1,325}{4 \cdot 3}} = 0,332. \quad (3)$$

Из таблиц распределения Стьюдента по числу степеней свободы $n(m-1) = 4 \cdot 2 = 8$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ находим $t_{кр} = 2,306$. Следовательно, $t_{кр} \cdot S_{\{y\}} = 2,306 \cdot 0,332 = 0,766$. Сравнивая полученное значение с коэффициентами уравнения регрессии, видим, что все коэффициенты меньше по абсолютной величине 0,766. Следовательно, все коэффициенты незначимы. На значение твердости содержание ванадия и молибдена в исследованных интервалах значимого влияния не оказывают.

Рассмотрим рис. 2 и табл. 6 и сделаем соответствующие выводы.



×100



×500

Рис. 2. Микроструктура индефинитного чугуна

Таблица 6

Результаты исследования микроструктуры индефинитного чугуна

Номер плавки	Толщина сечения, мм	Определение графита (ГОСТ 3443-87, шкала 3. А, Б, В, Г)	Вид структуры (ГОСТ 3443-87, шкала 5)
1	30	следы (<1 %)	М
1	20	следы (<1 %)	М
1	10	не обнаружен	М
2	30	ПГф1, ПГд45 (1,1%)	М
2	20	следы (<1 %)	М
2	10	не обнаружен	М
3	30	следы ВГ (<1 %)	М
3	20	следы ВГ (<1 %)	М
3	10	не обнаружен	М
4	30	следы ВГ (<1 %)	М
4	20	не обнаружен	М
4	10	не обнаружен	М

Для исследования влияния параметров производства на твердость и содержания графита в структуре рабочего слоя прокатных валков методом нормального уравнения были выбраны следующие качественные характеристики:

1. Процентное содержание графита на глубине 10 мм в исследованной пробе по ГОСТ 3443-87, шкала 3. А, Б, В, Г. Содержание графита оценивалось с помощью анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел SIAMS.

2. Результаты измерения твердости поверхности бочки прокатного валка динамическим твердомером методом отскока по шкале Шор.

База исходных данных составлена из прокатных валков с рабочим слоем из индефинитного чугуна, изготовленных ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков» за 2023 год.

Используя функцию «поиск решения», получено уравнение регрессии твердости в нормированном виде:

$$HSD = 71,32 - 0,54X_1 + 0,04X_2 + 2,5X_3 + 4,78X_4 - 0,19X_5 - 0,53X_6 + 0,96X_7 - 0,37X_8 + 0,81X_9 - 1,39X_{10} + 0,05X_{11}. \quad (4)$$

Для оценки влияния значимых параметров производства выполнен дополнительный расчет и выведено уравнение регрессии для значимых коэффициентов:

$$HSD = 71,24 + 2,74X_3 + 4,14X_4 + 0,74X_7 + 0,66X_9 - 2,0X_{10}. \quad (5)$$

В результате работы установлено, что наибольшее влияние на твердость прокатных валков оказывает содержание марганца, хрома, ванадия и бора в металле рабочего слоя. С увеличением их содержания твердость повышается.

Наибольшее влияние на твердость в исследованных интервалах оказывает содержание хрома. Это объясняется его карбидообразующим действием.

Карбиды хрома в структуре чугуна обладают большей твердостью и износостойкостью в сравнении с карбидами мартенситного типа.

Марганец помимо раскисления металла также является карбидообразующим элементом, увеличивающим твердость рабочего слоя прокатных валков.

Также значительное положительное влияние на твердость оказывает содержание ванадия. В структуре чугуна образует твердые растворы со значительной твердостью 2400-2800 HV. Карбиды ванадия обладают изоморфностью с решеткой аустенита, что обеспечивает их прочное соединение с матрицей.

Меньшее, но также положительное влияние на твердость прокатных валков оказывает содержание бора в металле рабочего слоя вследствие значительного влияния на процессы кристаллизации чугуна как поверхностно-активный элемент, он измельчает зерно и осуществляет дополнительное раскисление металла.

При этом следует учитывать, что высокое содержание карбидообразующих элементов должно компенсироваться увеличением содержания никеля и кремния для обеспечения выделения графита в структуре рабочего слоя и самой возможности эксплуатации прокатных валков из индифинитного чугуна.

Помимо карбидообразующих элементов на твердость прокатных валков значительное влияние оказывает глубина рабочего слоя, характеризующаяся массой заливаемого металла бандажа и степенью смыва высокопрочным чугуном при заливке металла сердцевины. При увеличении толщины бандажа твердость снижается вследствие замедления процесса кристаллизации и снижения доли выделения карбидов.

В результате декодирования входящих параметров получено линейное уравнение регрессии в натуральных переменных:

$$HSD = 71,24 + 15,63Mn + 8,91Cr + 6,72V + 5,63B - 0,10Pc, \quad (6)$$

где Mn – массовая доля марганца в металле рабочего слоя;

Cr – массовая доля хрома в металле рабочего слоя;

V – массовая доля ванадия в металле рабочего слоя;

B – массовая доля бора в металле рабочего слоя;

Pc – минимальная глубина рабочего слоя.

Уравнение регрессии в нормированном виде для расчета содержания графита представлено в виде

$$\begin{aligned} \%Gr = & 2,32 + 0,21X_1 - 0,03X_2 + 0,13X_3 - 0,96X_4 + \\ & + 0,65X_5 - 0,08X_6 + 0,31X_7 + 0,11X_8 - 0,07X_9 + \\ & + 0,28X_{10} - 0,38X_{11}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для оценки влияния значимых параметров производства выполнен дополнительный расчет и выведено уравнение регрессии для значимых коэффициентов:

$$\begin{aligned} \%Gr = & 2,43 + 0,2X_1 - 0,94X_4 + 0,68X_5 + \\ & + 0,30X_7 + 0,28X_{10} - 0,37X_{11}. \end{aligned} \quad (8)$$

Наиболее значимым коэффициентом является X_4 , характеризующий влияние хрома на выделение графита. Коэффициент отрицательный, что соответствует снижению интенсивности графитизации.

Вторым по значимости коэффициентом является содержание никеля. При увеличении доли никеля в металле рабочего слоя увеличивается содержание графита в структуре рабочего слоя. Никель неограниченно растворяется в железе и снижает растворимость углерода в чугуне, способствуя графитизации чугуна.

Также значительное отрицательное влияние на выделение графита оказывает температура заливки металла. Температура заливки тормозит процесс графитизации чугуна по причине замедления охлаждения отливки и укрупняет их первичную структуру.

С увеличением величины рабочего слоя увеличивается выделение графита, что связано с большим объемом металла в кокиле и, соответственно, снижением скорости кристаллизации.

Углерод и ванадий также способствуют повышению степени графитизации. С увеличением содержания углерода, часть его переходит в метастабильное состояние цементита, при этом благодаря комплексному легированию часть углерода остается в стабильном состоянии и выделяется в структуре металла рабочего слоя в виде графита.

В результате декодирования входящих параметров получено линейное уравнение регрессии в натуральных переменных:

$$\begin{aligned} \%Gr = & 12,87 + 1,46C - 2,01Cr + 0,78Ni + 2,73V + \\ & + 0,01Pc - 0,01t, \end{aligned} \quad (9)$$

где C – массовая доля углерода в металле рабочего слоя;

Cr – массовая доля хрома в металле рабочего слоя;

Ni – массовая доля марганца в металле рабочего слоя;

V – массовая доля ванадия в металле рабочего слоя;

Pc – минимальная глубина рабочего слоя;

t – температура заливки металла рабочего слоя.

Выводы

1. В результате проведения полнофакторного эксперимента влияния ванадия и молибдена на значение твердости не было выявлено.

2. Определено, что при сечении отливки менее 10 мм формирование графитовой фазы не происходит, так как весь углерод формируется в метастабильной фазе цементита.

3. Установлено, что с увеличением содержания марганца, хрома, ванадия и бора в рабочем слое повышается твердость прокатных валков.

4. Выявлено, что хром и температура заливки металла снижают интенсивность выделения графитовой фазы.

5. Никель неограниченно растворяется в железе и снижает растворимость углерода в чугуне, способ-

ствуя графитизации. Углерод и ванадий также способствуют повышению степени графитизации.

Список источников

1. Исследование процессов формирования структуры и свойств валковых сталей с целью создания их новых составов / В.М. Колокольцев, Н.А. Феоктистов, А.С. Савинов, Е.В. Скрипкин // Черные металлы. 2024. № 3. С. 28-32. DOI: 10.17580/chm.2024.03.05.
2. Исследование влияния легирования валкового чугуна ванадием / К.Н. Вдовин, Н. А. Феоктистов, Д. А. Горленко [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2019. № 4(766). С. 9-13.
3. Влияние технологии получения на структуру и свойства рабочего слоя прокатных валков из чугуна ЛПХНД-71 / К.Н. Вдовин, Д.А. Горленко, А.Н. Завалишин, Д.В. Куряев // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 4(778). С. 7-11.
4. Анализ влияния ванадия на микроструктуру и свойства валкового чугуна / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Д.А. Горленко, О.Н. Алехина // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 22–26 апреля 2019 года. Магнитогорск: Идво Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. Т. 1. С. 106.
5. Влияние ванадия на особенности выделения карбидной фазы в индифинитных чугунах рабочего слоя прокатных валков / К.Н. Вдовин, Н.В. Копцева, Д.С. Горленко [и др.] // Сталь. 2019. № 4. С. 55-59.
6. Гималетдинов Р.Х., Гулаков А.А., Тухватулин И.Х. Влияние химического состава на свойства рабочего слоя центробежно-литых индифинитных прокатных валков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14, № 3. С. 78-89. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-3-78-89.
7. Куряев Д.В., Цыбров С.В. Исследование влияния легирующих элементов на основные свойства чугуновых прокатных валков // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2017. № 16. С. 79-84.
8. Цыбров С.В., Вдовин К.Н., Зайцева А.А. Повышение эксплуатационных характеристик индифинитных валков центробежного литья // Литейщик России. 2012. № 3. С. 30.
9. Волчук В.Н. Исследования влияния химического состава чугуновых прокатных валков на их механические свойства // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2014. № 5(194). С. 12-18.
10. Производство прокатных валков в условиях ЗАО «МЗПВ» / Д.В. Куряев, А.В. Авдиенко, Д.М. Иванов, А.Б. Бойко // Теория и технология металлургического производства. 2017. № 2(21). С. 32-33.

Сведения об авторах

Щенникова Вероника Алексеевна – аспирант кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: shchennikova_00@mail.ru.

Феоктистов Николай Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: fna87@mail.ru.

Бойко Артем Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: boyko.ab@mzpv.mmk.ru.

Троянов Андрей Вадимович – студент кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: andrey.trojanov.00@bk.ru.

Сулицин Андрей Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Литейного производства и упрочняющих технологий», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия. E-mail: a.v.sulitcin@urfu.ru

Эпова Ирина Александровна – специалист по работе со студентами очной формы обучения, отдел мониторинга образовательного процесса учебно-методического управления, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

STUDY OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON THE GRAPHITE PHASE AND HARDNESS OF ROLLER CAST IRON

Shchennikova Veronica A. – graduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shchennikova_00@mail.ru.

Feoktistov Nikolay A. – PhD (Eng), Associate Professor, Head of the Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fna87@mail.ru.

Boyko Artem B. – PhD (Eng), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University E-mail: boyko.ab@mzpv.mmk.ru.

Troyanov Andrey V. – student of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: andrey.troyanov.00@bk.ru.

Sulitsin Andrey V. – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Foundry and Hardening Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.sulitsin@urfu.ru.

Epova Irina A. – Specialist in working with full-time students, Department of Educational Process Monitoring of the Educational and Methodological Administration, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The article considers the processes of graphitization of roller cast iron and the effect of chemical composition on the morphology of the graphite phase and its hardness. The effect of vanadium and molybdenum on the precipitation of the graphite phase at the concentration of vanadium and molybdenum is studied. A regression equation for the effect of chemical composition relative to the hardness value is obtained. At the same time, the influence of production parameters is estimated and regression equations for hardness and the content of the graphite phase in the working layer of the rolling roll are obtained using the normal equation method. Additionally, calculations are carried out to identify significant coefficients of the regression equation. The obtained results are of practical importance for the metallurgical industry, since they allow targeted control of the properties of roller cast iron by adjusting the chemical composition and technological production parameters.

Keywords: indefinite cast iron, full factorial experiment, rolling rolls, regression equation, hardness, graphite.

Ссылка на статью:

Изучение влияния химического состава на графитовую фазу и твердость валкового чугуна / Щенникова В.А., Феоктистов Н.А., Бойко А.Б., Троянов А.В., Сулицин А.В., Эпова И.А. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №2(53). С. 19-24.
Shchennikova V.A., Feoktistov N.A., Boyko A.B., Troyanov A.V., Sulitsin A.V., Epova I.A. Study of the influence of chemical composition on the graphite phase and hardness of roller cast iron. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 53, no. 2, pp. 19-24.