

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА МИКРОСТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

Л.С. Печенкина

Приведены результаты исследования влияния легирующих элементов на структурообразование самозакаливающихся белых чугунов

Ключевые слова: белый чугун, хром, ванадий, легирование, композиционная структура

Объектом исследования являются комплексно-легируемые белые чугуны для износостойких тонкостенных отливок, которые обладают необходимыми прочностью и ударной вязкостью без упрочняющей термической обработки. Но при изготовлении отливок из таких сплавов сложной конфигурации в процессе формирования мартенситно-карбидной структуры могут появиться микротрещины. Повышение ударной вязкости чугунов возможно более полным приближением структуры к композиционному виду. Поэтому задача исследования - оценка условий структурообразования, обеспечивающих формирование композиционной структуры сплавов. При планировании работы в качестве базовой была заложена микроструктура кристаллизующегося сплава, состоящая из разреженной двойной эвтектики А + МС, где А - аустенит, МС - карбид металла. Проведенные теоретические и экспериментальные расчеты показали, что в качестве базового может быть использован сплав следующего химического состава, %: 1,8-2,2 С; 2,5-4 Мн; 6-7 Cr; 6,5-8 V; до 1 Si [1]. При таком составе можно обеспечить сбалансированное содержание углерода и ванадия с целью исключения из структуры эвтектики других карбидных фаз, кроме кар-

бида МС. Известный композиционный характер такой структуры должен обеспечить сочетание высоких механических и эксплуатационных свойств [2,3].

Значительное влияние на фазовый состав металлической основы (матрицы) сплава оказывает марганец. Совместно с хромом он сильно повышает прокаливаемость сплава, увеличивая количество мартенсита в структуре. Однако наряду с этим он способствует и сохранению в структуре остаточного аустенита.

Количество аустенита в структуре сплавов определялось с помощью рентгеноструктурного анализа по специальной методике в зависимости от химического состава, который выражался в виде обобщенного параметра - параметра аустенизации P_A [4]:

$$P_A = C + Mn + 0,5Cr + 0,2V - 0,5Si + 0,5Mo + 0,2Cu - 0,5Al \quad (1)$$

Экспериментально исследованы 5 сплавов, химические составы которых, их параметры аустенизации и количество аустенита в структуре приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики химического состава и структуры экспериментально исследованных сплавов

Номер сплава	Содержание элементов, % мас.					P_A , %	А, %
	С	Мн	Cr	V	Si		
2	1,46	1,90	5,6	5,1	0,64	6,85	11,0
9	1,75	5,10	7,6	6,2	1,06	11,37	53,5
12	1,90	0,85	5,5	5,9	0,43	6,43	9,5
20	2,28	5,50	7,3	6,8	0,7	12,46	78,3
М1 ^{*)}	1,42	2,19	4,4	2,93	1,02	6,58	10,0

*) В сплаве М1 содержится также 1,24% Cu и 0,96% Mo.

Компьютерная обработка этих данных подтвердила экспоненциальный характер зависимости количества аустенита от концентрационного параметра аустенизации (рис. 1).

Эта зависимость применительно к исследованным сплавам для условий естественного структурообразования (охлаждение в литевой форме по газифицируемым моделям до ~ 700°C с последующей горячей выбивкой и дальнейшем охлаждении на воздухе) имеет следующий вид:

$$A = \exp(0,35 \cdot P_A); \quad (2)$$

где А – количество аустенита;
 P_A – параметр аустенизации; обе величины выражаются в мас. %.

Параметр аустенизации для всех исследованных сплавов рассчитан по уравнению (1) вместе с характеристиками структуры, в том числе и с количеством аустенита в структуре, рассчитанном по уравнению (2).

Особенно сильное влияние на количество аустенита в структуре сплавов оказывает содержание марганца.

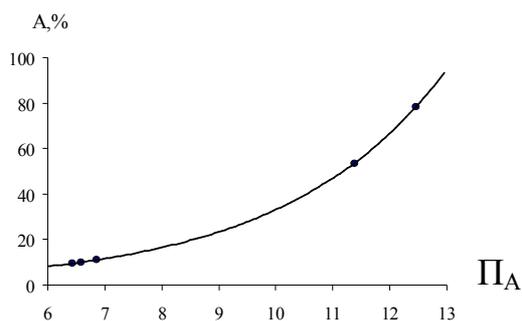


Рис. 1. Влияние химического состава сплава на степень аустенитизации структуры

На рис. 2 представлена зависимость количества аустенита от содержания марганца для сплавов со сравнительно небольшим разбросом по содержаниям углерода (2,06 – 2,3%), хрома (6 – 7%) и ванадия (6,1 – 7,1%). Видно, что эта зависимость практически линейная:

$$A = 10,3 \text{ Mn.} \quad (3)$$

При содержании марганца около 5% количество аустенита в структуре сплава становится преобладающим.

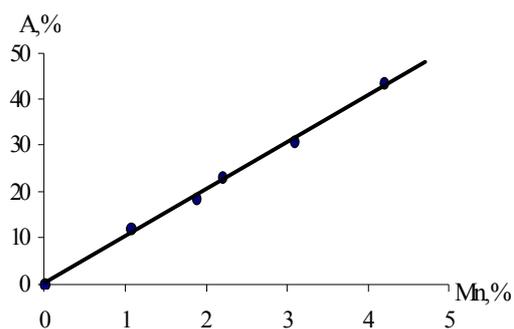


Рис. 2. Зависимость количества аустенита в структуре от содержания в сплаве марганца

На количество аустенита заметное влияние оказывают также хром и ванадий, растворяющиеся в аустените. Как будет показано ниже, в аустените в значительных количествах растворяется хром и намного хуже ванадий. Поэтому в сплавах с повышенным содержанием хрома (8,5% и более) количество аустенита оказывается значительно больше, чем следует из зависимости (3); особенно резко возрастает степень аустенитизации структуры при достаточно высоком содержании в сплавах марганца, хрома и ванадия (в сплаве при 5,14% Mn, 9,6% Cr и 8,3% V структура полностью аустенизирована).

Таблица 2

Результаты карбидного анализа сплавов

Но- мер спла- ва	Содержание элементов, %									Выход карби- дов
	в сплаве				в порошке					
	C	Mn	Cr	V	C	Mn	Cr	V	Fe	
20	2,28	5,50	7,3	6,8	15,6	2,91	13,7	51,7	15,2	12,9
2	1,46	1,90	5,6	5,1	18,5	0,33	5,4	72,6	2,4	6,8
9	1,75	5,10	7,6	6,2	18,5	0,46	6,9	71,8	2,4	8,2
12	1,90	0,85	5,5	5,9	16,4	0,65	10,4	57,7	14,1	10,0

Как показал анализ, в структуре исследуемых сплавов содержатся карбиды двух видов: MC (типа VC) и M₇C₃ (типа Cr₇C₃). Важную информацию может дать химический состав карбидов при его использовании для определения количества в структуре сплавов каждого вида карбидов и для оценки морфологических особенностей структуры.

Химический состав карбидов определен на нескольких сплавах с использованием методов карбидного и рентгеноспектрального анализов. В табл. 2 приведены химические составы сплавов и карбидных порошков, выделенных из этих сплавов с помощью карбидного анализа, а также выход карбидных порошков.

Рентгеноструктурный анализ порошков показал, что в сплавах 2 и 9 содержатся только карбиды MC, а в порошках сплавов 12 и 20 карбиды MC преобладают. Приведенные в табл. 2 данные позволяют оценить средний химический состав карбидов MC и расчетным путем из нормировки состава карбидных порошков по каждому элементу разделить карбиды MC и M₇C₃ и их химические составы в сплавах 12 и 20. Расчетным путем (по химическому составу сплавов и карбидных порошков) рассчитан также химический состав матрицы (аустенита при температуре закалки). Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Химические составы фаз и их содержание в структуре сплавов

Номер сплава	Фазы (или структурные составляющие)	Количество, % мас.	Содержание элементов, % мас.				
			С	Mn	Cr	V	Fe
1	2	3	4	5	6	7	8
	MC	6,8	18,5	0,33	5,4	72,6	2,4
	M ₇ C ₃	-	-	-	-	-	-
	матрица (аустенит А)	93,2	0,22	2,01	5,6	0,18	91
2	Среднее в сплаве	100	1,46	1,90	5,6	5,1	8
9	MC	8,2	18,5	0,46	6,9	71,8	2,4
	M ₇ C ₃	-	-	-	-	-	-
	А	91,8	0,25	5,5	7,7	0,34	86
	Среднее в сплаве	100	1,75	5,10	7,6	6,2	79
12	MC	7,8	18,5	0,24	5,3	72,7	2,5
	M ₇ C ₃	2,2	8,8	2,11	28,5	4,7	55,0
	А	90,0	0,29	0,87	5,0	0,14	93
	Среднее в сплаве	100	1,90	0,85	5,5	5,9	85
20	MC	9,0	18,5	0,40	6,7	72,0	1,8
	M ₇ C ₃	3,9	8,8	8,7	30,0	5,0	46,0
	А	87,1	0,27	5,9	6,4	0,12	85,0
	Среднее в сплаве	100	2,28	5,50	7,3	6,8	76

Данные карбидного анализа подтверждены результатами рентгеноспектрального анализа на установках «Стереоскан-180» и «Камека», проведенного на сплаве 20. На сканограммах участков поверхности образцов видно, что в структуре сплава содержится сравнительно мало карбидов, но много аустенита. В сплаве находятся эвтектики двух видов: двойная А + MC и тройная А + MC + M₇C₃. Использование фазового контраста на карбидах (карбид MC выглядит более темным) подтверждает, что на карбидах MC зарождаются не только колонии двойной эвтектики но и колонии тройной эвтектики.

Усредненные результаты количественного рентгеноспектрального анализа, приведенные в табл. 4, почти полностью повторяют данные карбидного анализа.

Несколько повышенное содержание ванадия в аустените по сравнению с результатами карбидного анализа объясняется тем, что совместно с аустенитом сканированию подвергались и дисперсные включения карбидов MC, выделявшиеся из аустенита и при карбидном анализе переводимые в осадок.

Таблица 4

Химические составы фаз в сплаве 20 по данным рентгеноспектрального анализа

Фазы	Содержание элементов, % мас.		
	Mn	Cr	V
MC	0,5	7	72
M ₇ C ₃	8,5	32	6,5
А	6,0	7	0,6

Таким образом, результаты фазового анализа показывают, что в исследуемых сплавах содержание хрома в матрице и в карбидах MC близко к среднему содержанию его в сплаве. Содержание ванадия в матрице очень мало и обычно при температурах около 600°C (ниже этих температур в условиях воздушной закалки диффузионное перераспределение элементов замещения в аустените практически не происходит) составляет 0,2-0,3% (в среднем 0,22%). Из соотношения между содержаниями ванадия и других металлов в карбидах MC

видно, что примерно 10% содержащегося в них ванадия замещаются хромом, железом и марганцем. Поэтому количество ванадия и других металлических элементов, участвующих в образовании карбидов MC можно оценить по формуле

$$M_{MC} = 1,1 (V - 0,2), \% \quad (4)$$

где V – среднее содержание ванадия в сплаве.

Тогда с учетом содержания углерода в карбидах MC (~ 18,5% мас.) можно рассчитать количество этих карбидов в структуре сплава (V_{MC}):

$$V_{MC} = \frac{100}{100 - 18,5} M_{MC} \approx 1,35V - 0,27 \quad (5)$$

Расчет количества карбидов M_7C_3 можно провести, исходя из нормировки по углероду. В аустените максимальное содержание углерода после выделения всех карбидов составляет 0,30%. Учитывая количество карбидов MC, содержание углерода в них (18,5%) и в карбидах M_7C_3 (8,8%), а также среднее содержание углерода в сплаве $C_{спл}$, имеем:

$$V_{M_7C_3} \cdot C_{M_7C_3} + V_{MC} \cdot C_{MC} + V_A \cdot C_A = 100 \cdot C_{спл}, \quad (6)$$

где $V_{M_7C_3}$, V_{MC} и V_A – количество каждой фазы, мас.%;

$C_{M_7C_3}$, C_{MC} и C_A – содержание углерода в соответствующих фазах, мас.%.
Учитывая, что $V_A = 100 - V_{M_7C_3} - V_{MC}$, а также значения содержаний углерода в фазах, имеем

$$V_{M_7C_3} = \frac{100C_{спл} - 18,2V_{MC} - 3,5}{8,5} \quad (7)$$

Проведены расчеты фазового состава всех исследованных сплавов (в ряде случаев откорректированные по экспериментальным данным). Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными показало, что максимальная погрешность расчетов составляет $\pm 0,1\%$. Приведены значения критического содержания ванадия V^* , а также дефицит ванадия в сплавах ΔV , рассчитанный по формуле

$$\Delta V = V^* - V, \quad (8)$$

где V – среднее содержание ванадия в сплаве, % мас.

Проведенный анализ результатов показал, что при значительном дефиците ванадия в структуре сплавов появляются карбиды M_7C_3 . Однако при небольшом дефиците (0,1-0,2 % V) эти карбиды практически в структуре не обнаруживаются и структура сплавов сохраняет композиционный характер. В таких сплавах могут присутствовать в очень небольшом количестве дисперсные карбиды M_7C_3 , но на характер структуры они не влияют.

При значительном дефиците ванадия (1% и более) карбиды M_7C_3 могут выделяться в структуре в виде сетки тройной квазиэвтектики или вторич-

ных карбидов. Как было показано выше, частично такую структуру можно улучшить с помощью термической обработки, однако на свойствах сплава ее влияние все же проявляется (снижением прочности и ударной вязкости).

Менее сказывается влияние дефицита ванадия в сплавах с медью, молибденом и микролегирующими элементами (сплавы M1 - M7). В этих сплавах дополнительные легирующие элементы существенно измельчают микроструктуру. Особое влияние оказывает медь. Она способствует формированию разреженной двойной эвтектики A + MC с очень равномерным рас-положением ее колоний. При этом меняется и форма карбидных включений, армирующих колонии. Значительно уменьшается разветвленность карбидных каркасов, появляются мелкие пластинки. Эти изменения в сочетании с измельчением колоний приводят к заметному повышению прочности. Микроструктура сплава приведена на рис. 3. При достаточно высоком содержании меди (1% и более) в структуре сплава могут появляться мелкие включения медистой фазы. Медистая фаза совместно с аустенитом играет роль демпфера при возникновении локальных динамических нагрузок (например, при мартенситном превращении), снижая возможность образования микротрещин, что было отмечено при анализе дефектов в отливках из исследуемых сплавов.

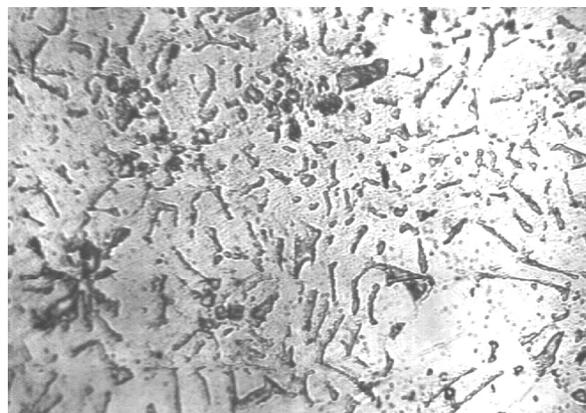


Рис. 3. Микроструктура сплава M4, x 600

Характерно также, что в сплавах с дополнительным легированием отрицательное влияние карбидов M_7C_3 практически не проявляется. Объясняется это их сильной измельченностью и равномерным распределением в матрице. Поэтому в таких комплексно-легируемых сплавах можно допускать дефицит ванадия 2%.

Таким образом, разработанная методика определения фазового состава комплексно-легируемых чугунов, основанная на использовании в качестве исходных экспериментальные данные рентгеноструктурного, рентгеноспектрального и карбидного анализов ограниченного количества сплавов, позволит определить химический состав

для формирования композиционной структуры большого числа сплавов. Возможен и другой вариант оптимизации сплавов - путем их дополнительного комплексного легирования.

Литература

1. Сильман Г.И. Влияние химического состава на свойства самозакаливающихся чугунов [Текст] / Г. И. Сильман, Л. С. Печенкина, А. А. Щетинин // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. Сер. Материаловедение. – 2001. - Вып. 1.10. – С.32-34.

2. Печенкина, Л.С. Разработка износостойких самозакаливающихся сплавов для тонкостенных точнолитых деталей [Текст]: Дис. канд. техн. наук:

05.16.01 : защищена 20.06.2000 : утв. 12.12.2000 / Л.С. Печенкина– Курск, 2000. - 193 с.

3. Печенкина, Л.С. Влияние хрома и ванадия на композиционную структуру в малоуглеродистых белых чугунах [Текст]/ Л.С. Печенкина, Г.И. Сильман, А.А. Рукавицына // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. Т.11. - № 6. – С.13-17.

4. Серпик, Л.Г. Разработка, исследование и применение износостойких белых чугунов высокой прокаливаемости [Текст] : Дис. ... канд. техн. наук 05.16.01 защищена 19.06.1991 : утв. 20.12.1991 / Л.Г. Серпик. – Тула, 1991. – 238 с.

Воронежский государственный технический университет

EFFECT OF CHEMICAL COMPOSITION ON THE MICROSTRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF LOW-CARBON WHITE CAST IRON

L.S. Pechenkina

The results of studies of the effect of alloying elements on structure air-hardening white irons

Key words: white iron, chromium, vanadium, alloying, composite structure