



The resource-saving method of iron-carbon metals smelting, providing direct alloying of melts by metal elements of oxides is developed.

*А. И. ГАРОСТ, Белорусский государственный технологический университет,
Г. П. ГОРЕЦКИЙ, Физико-технический институт НАН Беларуси,
V. VAJSOVÁ, University of Jan Evangelista Purkyně in Ústí nad Labem (Czech Republic),
В. Г. ПАВЛОВИЧ, СООО «Литбелэкспо»*

УДК 669.011/012:502.174

УЛУЧШЕНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПРЯМОМ ЛЕГИРОВАНИИ И МОДИФИЦИРОВАНИИ

Введение

При реализации ряда технологических процессов образуется значительное количество металло-содержащих отходов, преимущественно в виде оксидов (окалина, ржавчина, шлифовочные отходы, отходы футеровочных материалов и т. д.). Использование известных восстановителей (углерода, в виде коксовой и графитной пыли, порошкового древесного угля) в металлургическом производстве не обеспечивает достаточную степень извлечения металлов. Требуется создание нетрадиционных методов обработки расплавов и поиск новых материалов, содержащих элементы с более высоким средством к кислороду. Эффективными восстановителями металлов из оксидов могут стать атомарные водород и углерод, которые могут образовываться в объеме расплава при вводе и пиролизе высокомолекулярных соединений в металлической ванне [1, 2].

Создан ресурсосберегающий способ выплавки чугуна и стали [2], предусматривающий прямое легирование железоуглеродистых сплавов металлическими элементами из оксидов.

Технология прямого легирования чугуна металлическими элементами из промышленных отходов и полупродуктов смежных производств

Известно [3], что ванадиевые чугуны обладают исключительно высокой стойкостью в условиях трения. Износостойкость их в 2–7 раз выше стали ШХ15, закаленной и отпущенной на HRC 61, и практически равна стойкости быстрорежущей стали P18 твердостью HRC 66. Эти данные относятся к чугунам в сыром состоянии, имеющим твердость HB 3880 МПа, сравнительно легко обрабатываемым твердосплавным инструментом и дающим прочную витую стружку.

Из-за дефицитности и дороговизны феррованадия необходимо разрабатывать методы выплавки ванадиевых чугунов с использованием ванадийсодержащих отходов, в том числе оксидов ванадия. Наиболее перспективным вариантом ввода ванадия в расплав может быть прямое легирование, при котором в качестве восстановителя используется атомарный водород, являющийся продуктом пиролиза высокополимерных соединений в расплаве.

Т а б л и ц а 1. Технологические особенности восстановления ванадия из оксидов при прямом легировании чугуна

Массовая доля вводимой добавки V ₂ O ₅ , мас. %	Состав блока (V ₂ O ₅ + высокомолекулярное соединение (ВМС))	Соотношение m _{окс} /m _{ВМС}	Введено металлического V (с оксидом V ₂ O ₅), г	Введено водорода из ВМС, г	Введено углерода из ВМС, г	Усвоено металла (находится в составе чугуна), г	Усвоение металла, %	Количество V, которое могло бы быть восстановлено водородом, г
3,60	800 г V ₂ O ₅ ; 250 г ВМС	3,200	448,35	44,25	С (атом.)-89,25; С (сажа)-76,93	67,76	15,10	451,350
6,36	1400 г V ₂ O ₅ ; 477 г ВМС	2,935	784,56	84,42	С (атом.)-170,29; С (сажа)-146,77	170,28	21,70	861,084
9,09	2000 г V ₂ O ₅ ; 677 г ВМС	2,954	1208	119,83	С (атом.)-241,69; С (сажа)-208,31	268,84	22,25	1222,266

Т а б л и ц а 2. Химический состав и механические характеристики чугуна, легированного ванадием из оксидов

Массовая доля вводимой добавки V ₂ O ₅ , мас. %	Компонентный состав, мас. %												Механические характеристики	
	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cr	Ni	Mo	Cu	V	W	HB, МПа	σ _B , МПа
Не вводилась	3,15	1,73	0,289	0,328	0,114	0,284	0,095	0,052	<0,001	0,088	0,018	0,032	2690	1160
3,60	3,20	2,32	0,405	0,272	0,109	0,054	0,083	0,083	<0,001	0,099	0,326	0,031	2690	1880
6,36	2,90	1,82	0,315	0,315	0,095	0,038	0,097	0,092	0,003	0,214	0,792	0,048		
9,09	3,27	1,40	0,243	0,140	0,064	0,020	0,082	0,080	0,003	0,200	1,240	0,045	5550	

Плавку проводили в высокочастотной индукционной печи на кислой футеровке. На стадии доводки металла в расплав чугуна подавали легирующие и модифицирующие добавки в виде брикетов (табл. 1). Исследования химического состава полученных чугунов (табл. 2) указывают на эффективность технологии прямого легирования расплава.

Структура и микросостав легированных чугунов

Структуру чугуна, легированного ванадием из оксидов, исследовали в соответствии с ГОСТ 3443-87 (табл. 3).

Структура исходного чугуна с 0,018% V (рис. 1) – серый чугун с пластинчатым графитом. Около 50% перлита. Феррит неоднородный – в нем присутствует цементит. По всему полю матрицы, т. е. в феррите и перлите, просматриваются дисперсные карбидные выделения, отличающиеся от цементита.

При исследовании исходного и модифицированного чугунов на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610LV (фирма JEOL, Япония) методом электронно-зондового EDX анализа на детекторе IED 2201 определяли состав (табл. 4)

и морфологию образующихся неметаллических включений.

Обнаруживаемые преимущественно в перлите включения размером до 0,5–1,0 мкм относятся (по результатам сканирующей электронной микроскопии) к карбидам железа (табл. 4) с растворенной медью (поз. 1, рис. 1, д) и оксидными выделениями. Феррит (поз. 2, рис. 1, д) имеет классический состав, а перлит (поз. 3, рис. 1, д) несколько обогащен медью и кислородом, вероятно, за счет присутствия отмеченных выше комплексных карбоксидных выделений.

В результате прямого восстановления оксидов получены сплавы с содержанием 0,326% V (введено 3,6% V₂O₅), 0,792% V (введено 6,36% V₂O₅) и 1,240% V (введено 9,09% V₂O₅).

Структура сплава с 0,326% V (рис. 2) аналогична предыдущему исходному сплаву – феррито-перлитная матрица с пластинчатым графитом. В матрице выделяются специальные карбиды. В больших ферритных зернах образуется цементит. Таких включений больше, чем в исходном сплаве.

Метод сканирующей электронной микроскопии позволяет обнаружить (табл. 4) мелкие (раз-

Т а б л и ц а 3. Результаты исследований структуры чугуна, в который добавлялись пакеты с оксидами ванадия и высокомолекулярными соединениями

Массовая доля вводимой добавки V ₂ O ₅ , мас. %	Форма включений графита	Длина включений графита	Распределение включений графита	Количество включений графита	Тип структуры металлической основы	Дисперсность перлита	Количество перлита и феррита	
Не вводилась	Пластическая прямолинейная ПГф1	ПГд90	ПГр1	ПГ6	Пт1 Ф	Пд1,4	П70 (Fe30)	Ц10
3,60	Пластическая прямолинейная ПГф1	ПГд90	ПГр1	ПГ6	Пт1 Ф	Пд1,4	П96 (Fe4)	Ц25000
6,36	Пластическая прямолинейная ПГф2	ПГд90	ПГр1	ПГ6	Пт1 Ф	Пд1,4	П6	Ц25000
9,09	Графит отсутствует (перлит + цементит)					Пд1,6	П6	Ц25000

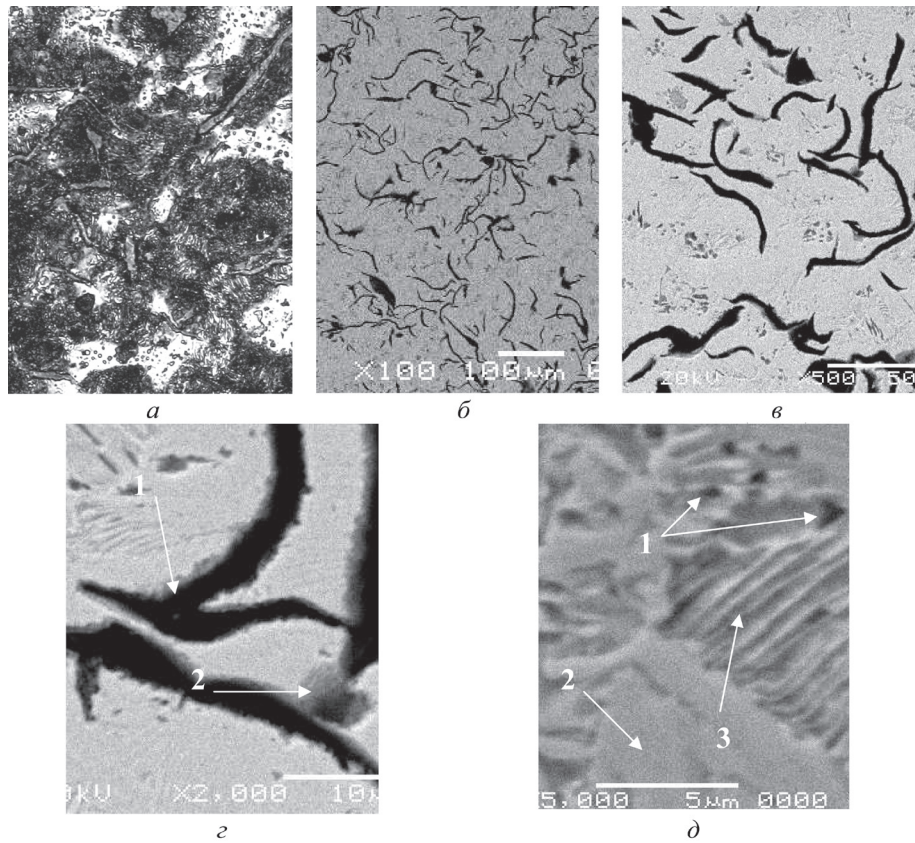


Рис. 1. Микроструктура исходного чугуна (образцы травлены): *a* – металлографические исследования; *б–д* – исследования методом сканирующей электронной микроскопии. *a*, *в* – $\times 500$; *б* – $\times 100$; *г* – $\times 2000$; *д* – $\times 5000$

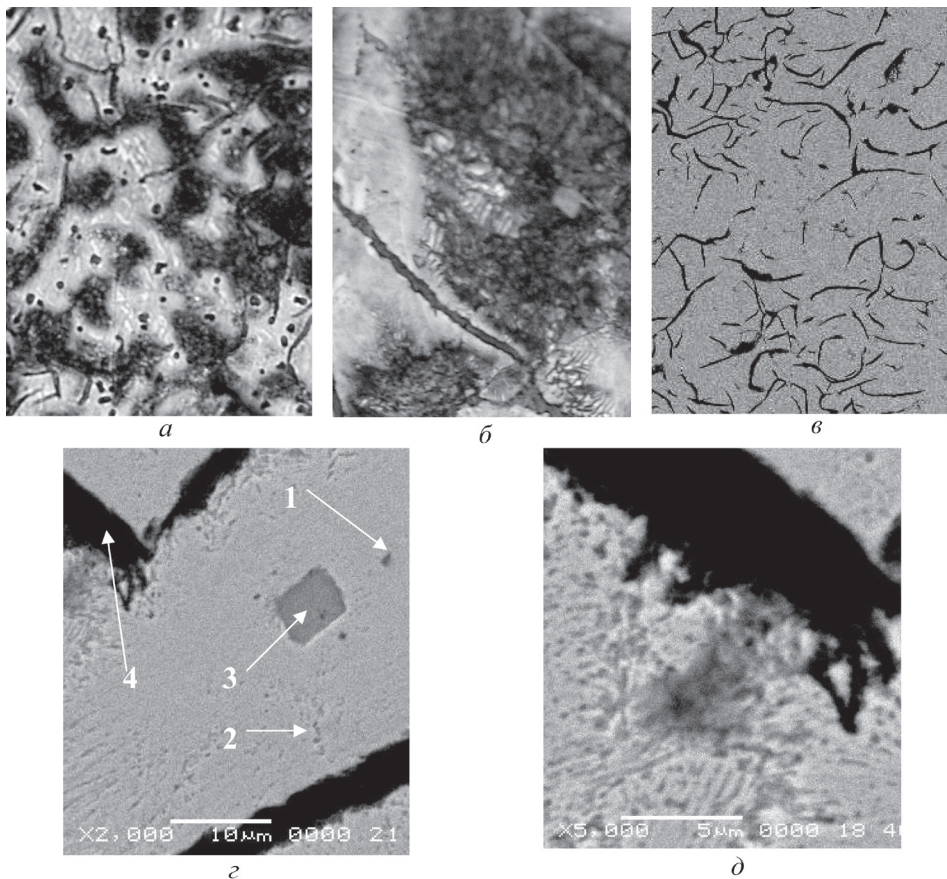


Рис. 2. Микроструктура чугуна с 0,326% V (введено 3,60% V_2O_5) (образцы травлены): *a*, *б* – металлографические исследования; *в–д* – исследования методом сканирующей электронной микроскопии: *a* – $\times 250$; *б* – $\times 1000$; *в* – $\times 100$; *г* – $\times 2000$; *д* – $\times 5000$

Таблица 4. Химический состав неметаллических включений чугуна, модифицированного ванадием из оксидов

Массовая доля вводимой добавки V ₂ O ₅ , мас.%	Позиция включения	Содержание элементов, мас.%									
		C	O	Si	Mn	S	W	V	Cu	N	Fe
Не вводилась	1 (рис. 1, г)	76,05		0,34					0,86		22,75
	2 (рис. 1, г)	6,11	1,45	1,52					0,57		90,35
	1 (рис. 1, д)	12,75	4,03	0,54				0,08	3,08		79,52
	3 (рис. 1, д)	4,51	4,77	1,84				0,08	1,52		87,28
	2 (рис. 1, д)	0,68	0,69	1,39				0,08			97,16
3,60	(рис. 2, в)	14,25	0,31	1,76			0,78	0,85	2,81	1,76	77,49
	1 (рис. 2, г)	8,35	2,66	1,60			0,54	0,20	8,74		77,92
	2 (рис. 2, г)	2,59	0,27	1,77			0,78	0,44	11,47		82,68
	3 (рис. 2, г)	36,60			63,40						
	4 (рис. 2, г)	81,04									18,96
9,09	1 (рис. 3, г)	2,77	1,73	0,08				3,31	0,81		91,30
	2 (рис. 3, г)				65,46	34,54					
	1 (рис. 3, д)	8,13	8,70	0,26				1,43	3,92		77,56

мером до 0,2 мкм) ванадийвольфрамовые карбиды (поз. 1 и 2, рис. 2, з) с повышенным содержанием меди.

Такие частично графитизированные ванадиевые чугуны имеют структуру, соответствующую принципу Шарли, в которой значительная часть углерода присутствует в виде пластинчатого гра-

фита, а часть связана в ванадийвольфрамовых карбидах.

Структура чугуна с 1,24% V (рис. 3) ледебуритная, в промежутках между цементитом – перлитно-ферритная матрица. Весь ванадий находится в составе цементита, так как мелкие карбиды ванадия отсутствуют. Такие выводы подтверж-

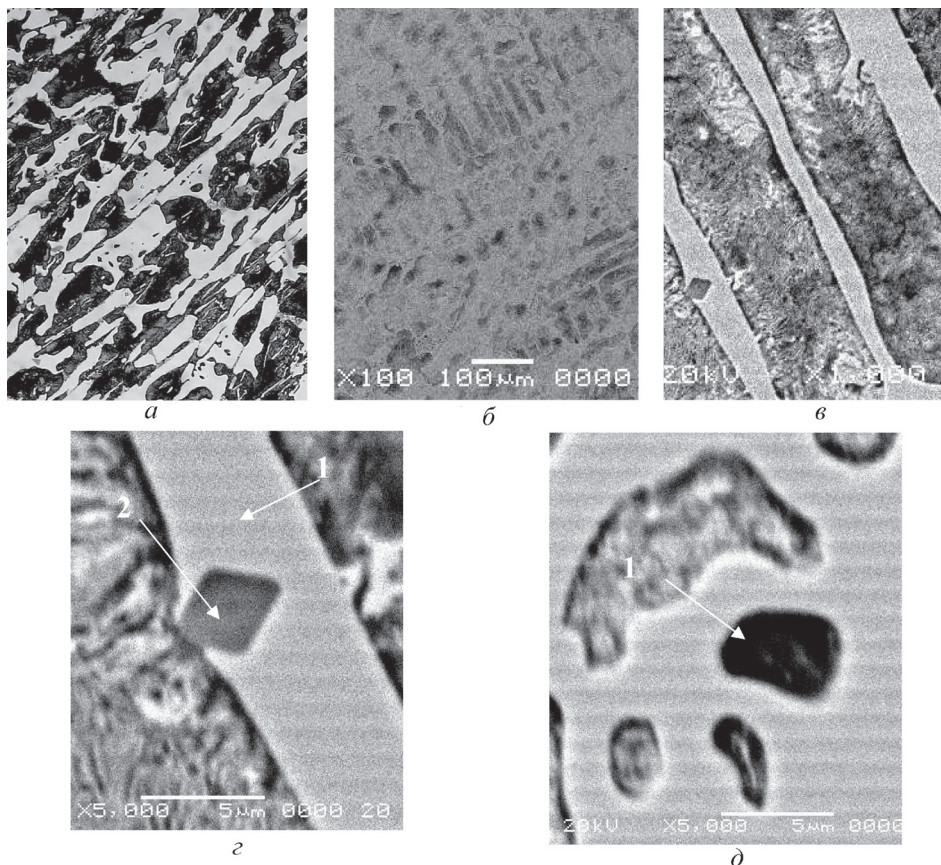


Рис. 3. Микроструктура чугуна с 1,24% V (введено 9,09% V₂O₅) (образцы травлены): а – металлографические исследования; б–д – исследования методом сканирующей электронной микроскопии: а – ×250; б – ×100; в – ×1000; з – ×5000; д – ×5000

даются как металлографическими, так и исследованиями методом сканирующей электронной микроскопии (табл. 4).

Выводы

Технология прямого легирования может быть реализована практически в любых сталеплавильных цехах без существенной реконструкции дей-

ствующего оборудования. Использование оксидов металла снижает себестоимость готовой продукции, так как суммарная стоимость оксидов металла и восстановителя всегда ниже стоимости эквивалентного количества металла в ферросплавах. Отсутствует необходимость использования дорогих ферросплавов при выплавке железоуглеродистых сплавов.

Литература

1. Гарост А. И. Железоуглеродистые сплавы: структурообразование и свойства. Мн.: Беларуская навука, 2010.
2. Гарост А. И. Способ выплавки чугуна и способ выплавки стали. Пат. Республики Беларусь № 11641 от 26.11.2008 г.
3. Белый износостойкий ванадиевый чугун / В. А. Шалашов, Г. И. Сильман, Ю. Н. Таран и др. // Литейное производство. 1970. № 6. С. 7–10.