

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.18.046.554 – 982

Кошкарлов А.А.

БАЛАНС КИСЛОРОДА ПРИ ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИИ В RH-ВАКУУМАТОРЕ

Аннотация. В настоящее время основная часть автокузовных деталей выполняется из IF-стали (Interstitial Free) — сталь без свободных атомов внедрения, с очень низким содержанием углерода и азота в твёрдом растворе (феррите). Содержание углерода в ней менее 0,003%. В статье произведен анализ плавов IF-сталей, проведенных в кислородно-конвертерном цехе с вакуумным обезуглероживанием, раскислением и легированием металла титаном при вакуумировании металла в вакуумном агрегате RH-типа. Производился анализ ранее выплавленных плавов IF-сталей, на его основании был произведен балансовый расчет изменения содержания углерода в металле при его обезуглероживании в вакууме. Основная часть кислорода, который растворяется в жидком металле, поступает в металл при его продувке в кислородном конвертере. При этом автором выявлены дополнительные источники поступления кислорода в металл при вакуумной обработке. Основным дополнительным источником кислорода можно считать кислород, поступающий вместе с транспортирующим газом — аргоном. Также было установлено, что часть растворенного углерода взаимодействует с остаточными элементами (хром, титан, ванадий, ниобий и др.), которые в виде карбидов содержатся в жидком растворе металла.

Ключевые слова: IF-стали, вакуумирование, карбиды, окисленность металла, чистота аргона

Основным потребителем сталей типа IF являются производители автокузовных деталей. Это связано с их особенными свойствами: во-первых, с обеспечением очень глубокой вытяжки металла и хорошим перераспределением напряжений; во-вторых, они гарантируют равномерность толщины и прочность штампованных деталей кузова; в-третьих, IF-стали характеризуются высокой пластичностью и равномерным удлинением при штамповке [1, 2].

В современных конвертерных цехах глубокое обезуглероживание осуществляют при вакуумировании нераскисленного металла на агрегатах RH-типа (рис. 1). При этом содержание углерода в нем снижается с 0,020–0,050, до 0,001–0,003%. Окисление углерода идет за счет растворенного кислорода в металле и других источников кислорода [3–7]. В связи с этим есть необходимость оценить участие кислорода из всех этих источников.

В статье проведены результаты анализа паспортов пяти опытных промышленных плавов IF-сталей. При проведении анализа этих плавов учитывались следующие параметры, необходимые для материального расчета:

- содержание углерода до и после вакуумной обработки;
- окисленность металла до вакуумной обработки, перед раскислением металла и по ходу вакуумного обезуглероживания;
- расход и чистота аргона, применяемого при вакуумной обработке;
- время вакуумирования нераскисленного металла.

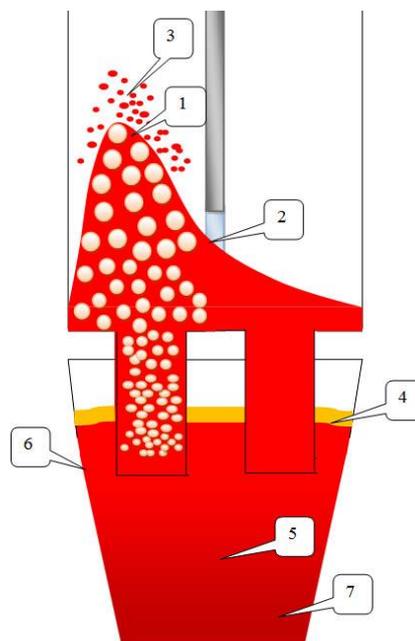


Рис. 1. Схема зон взаимодействия при обработке металла на циркуляционном вакууматоре:
 1 – зона обезуглероживания металла в поверхностном слое металла в вакуум-камере;
 2 – зона взаимодействия металла с кислородом продувки; 3 – зона взаимодействия капель металла с атмосферой вакуум-камеры;
 4 – зона взаимодействия металла и шлака;
 5 – зона перемешивания металла в ковше;
 6 – зона взаимодействия металл-шлак-футеровка или металл-футеровка; 7 – зона взаимодействия застойных областей металла в ковше с потоком металла из вакуум-камеры

Изначально необходимо определить основные статьи прихода кислорода в металл. Основной статьей поступления кислорода является начальная окисленность металла (полученная за счет растворения кислорода в металле при продувке в конвертере). К дополнительным (второстепенным) статьям поступления кислорода стоит отнести:

- кислород, поступающий в металл в процессе продувки его аргоном во время вакуумирования;
- кислород, поступающий в металл из атмосферного воздуха, который может просачиваться в вакуум-камеру через поры, щели, клапаны и т.д.;
- кислород, поступающий в металл из шлака в процессе диссоциации оксидов.

Учитывая, что в процессе вакуумной плавки не производится постоянного мониторинга чистоты поступающего аргона, то для расчета баланса будет использоваться среднее значение содержания кислорода в 1 м³ аргона. Данное содержание кислорода рассчитано из полученных данных замеров чистоты аргона в разные промежутки времени, которое составляет 0,00005 % (0,5 ppm).

Объем поступившего кислорода с аргоном можно рассчитать по следующей формуле:

$$V_{O} = \frac{O_{Ar} \cdot M_{мет}}{100\% \cdot \mu_{[O]} \cdot k} V_{м} \cdot V_{Ar}, \quad (1)$$

где V_{O} – объем поступившего кислорода в металл из аргона, м³;

O_{Ar} – содержание кислорода в аргоне, %;

$M_{мет}$ – масса металла, кг;

$V_{м}$ – молярный объем, м³/кмоль;

$\mu_{[O]}$ – молярная масса кислорода, кг/кмоль;

k – стехиометрический коэффициент;

V_{Ar} – потребление аргона во время вакуумирования нераскисленного металла, м³.

В табл. 1 приведены данные из паспортов плавов

по содержанию кислорода перед вакуумированием ($[O]_{нач.}$) и до раскисления металла ($[O]_{до\ раск.}$), а также поступление аргона до раскисления металла ($Ar_{нераск}$) и какое количество кислорода поступило с ним (V_{O} поступ. с Ar).

Данную статью можно считать одной из важных при расчете баланса, так как в процессе вакуумной обработки сталей типа IF происходит большое потребление аргона.

Стоит отметить, что часть углерода в металле связана в прочные карбидные соединения с Cr, Ti, V, Nb и Mo, на диссоциацию которых требуется избыточное содержание кислорода в металле (3). Другая часть углерода находится в менее прочных связях (2). При вакуумном обезуглероживании металла в первую очередь будут протекать реакции окисления углерода менее прочных карбидных связей с другими элементами [8, 9].



Зная содержание данных элементов в металле, можно произвести расчет содержания карбидов:

$$N_{карб} = \frac{[A]}{a \cdot M_{эл}} \cdot M_{карб}, \quad (4)$$

где $N_{карб}$ – содержание карбида в металле, %;

$[A]$ – содержание химического элемента в металле, %;

a – стехиометрический коэффициент элемента, содержащегося в карбиде;

$M_{эл}$ – молярная масса элемента, кг/моль;

$M_{карб}$ – молярная масса карбида, кг/моль.

В табл. 2 представлены данные по содержанию данных элементов в пробах опытных плавов, а так же расчет их карбидов.

Таблица 1

Содержание кислорода в металле до вакуумирования и раскисления в вакуум-камере и поступление кислорода с аргоном

	Масса металла, кг	$Ar_{нераск.}$, м ³	V_{O} поступ. с Ar, м ³	$[O]_{Ar}$, %	$[O]_{нач.}$, %	$\Sigma[O]$, % (4+5)	$[O]_{до\ раск.}$, %
	1	2	3	4	5	6	7
1	349940	122,2	14,36	0,0059	0,0508	0,0566	0,02
2	356820	113,8	13,64	0,0055	0,0586	0,0641	0,0228
3	383170	100,3	12,91	0,0048	0,0607	0,0655	0,0317
4	352110	65,6	7,76	0,0031	0,0392	0,0423	0,0074
5	357838	101,1	12,16	0,0049	0,0452	0,0500	0,0137

Содержание элементов в опытных плавках и их карбидах

	Содержание элементов в металле, %				
	Cr	Ti	V	Nb	Mo
1	0,0204	0,0006	0,0002	0,0014	0,0017
2	0,018	0,0006	0,0002	0,0011	0,0049
3	0,02	0,0004	0,0002	0,0014	0,0021
4	0,0285	0,0006	0,0004	0,0016	0,0024
5	0,0203	0,001	0,0002	0,0019	0,0061
	Содержание карбидов в металле, %				
	Cr ₃ C ₂	TiC	VC	NbC	MoC
1	0,024	0,001	0,000	0,002	0,002
2	0,021	0,001	0,000	0,001	0,006
3	0,023	0,001	0,000	0,002	0,002
4	0,033	0,001	0,000	0,002	0,003
5	0,023	0,001	0,000	0,002	0,007
	Содержание углерода в карбидах, %				
	Cr ₃ C ₂	TiC	VC	NbC	MoC
1	0,00628	0,000150	0,000044	0,000182	0,000210
2	0,00554	0,000150	0,000044	0,000143	0,000606
3	0,00616	0,000100	0,000044	0,000182	0,000260
4	0,00877	0,000150	0,000088	0,000208	0,000297
5	0,00625	0,000250	0,000044	0,000247	0,000755

На основании полученных значений процентного содержания карбидных связей, которые содержатся в металле, можно произвести расчет связанного в них углерода:

$$[C] = N_{\text{карб}} \cdot \frac{bM_{[C]}}{(a \cdot M_{\text{эл}}) + (b \cdot M_{[C]})}, \quad (5)$$

где $[C]$ – содержание углерода в карбиде, %;
 a и b – стехиометрические коэффициенты;
 $M_{[C]}$ – молярная масса углерода, кг/моль.

В табл. 3 приведены данные расчета количества углерода, связанного в карбиды Cr, Ti, V, Nb и Mo, и количества углерода, содержащегося в менее прочных связях ($[C]$ ост), а также количество углерода, прореагировавшего (ΔC) с растворенным кислородом в металле.

Таблица 3

Анализ содержания и изменения углерода в опытных плавках

	[C] нач., %	$\Sigma[C]$ в карб., %	[C] ост, % (1-2)	[C] кон., %	$\Delta[C]$, %
	1	2	3	4	5
1	0,0364	0,00687	0,02953	0,0019	0,02763
2	0,032	0,00648	0,02552	0,0028	0,02272
3	0,0241	0,00674	0,01736	0,0023	0,01506
4	0,031	0,00952	0,02148	0,0035	0,01798
5	0,0371	0,00755	0,02955	0,0027	0,02685

Основываясь на проведенный расчет табл. 3, можно рассчитать необходимое количество растворенного кислорода для окисления углерода, который содержится в менее прочных связях [10]:

$$\Delta[O]_{\text{расч}} = \frac{\Delta[C] \cdot \mu_{[O]}}{\mu_{[C]}}. \quad (6)$$

Для сравнения расчетов по формуле (6), согласно данным табл. 3, со значениями в табл. 1, была составлена табл. 4, где отражен расход растворенного кислорода в металле.

Таблица 4

Изменение растворенного кислорода в металле при его вакуумном обезуглероживании

	$\Delta[C]$, % (см. табл. 3)	$\Delta[O]_{\text{расч.}}$, % (по формуле (6))	$\Delta[O]$, % (см. табл. 1, гр. 6-7)
1	0,02763	0,0368	0,0366
2	0,02272	0,0303	0,0413
3	0,01506	0,0201	0,0338
4	0,01798	0,0240	0,0349
5	0,02685	0,0358	0,0363

Остаточная окисленность металла, которая определяется при помощи контрольно-измерительных приборов, показывает содержание кислорода, который связан и образует оксидные соединения, преимущественно с Mn и P.

По результатам проведенного расчета наблюдалось совпадение значений требуемого кислорода для проведения обезуглероживания металла ($\Delta[O]_{\text{расч.}}$) со значениями изменения кислорода в опытных плавках ($\Delta[O]$) либо были ниже значений $\Delta[O]$. В случае когда $\Delta[O]_{\text{расч.}}$ меньше $\Delta[O]$, можно предположить, что кислород с транспортирующим газом не поступал.

Рассматривая возможность поступления кислорода из атмосферного воздуха, который может просачиваться в вакуум-камеру через поры, щели, клапаны и т.д., следует учитывать, что данный кислород не поступает в зону барботажа металла. При этом стоит считать величину поступающего кислорода из атмосферного воздуха очень малой, так как при больших объемах просачивающегося воздуха в вакуум-камере не создавалось глубокого разряжения (1–1,5 мбар). Поэтому данная статья не считается лимитирующей и при расчете баланса статья упраздняется из-за очень низкого влияния.

Необходимо учитывать, что во время заглублинения патрубков вакуум-камеры в сталеразливочный ковш в вакуум-камеру поступает некоторый объем шлака, состоящий преимущественно из оксидных соединений, которые в процессе вакуумной обработки могут диссоциировать на компоненты с выделением кислорода в металл. Но при выплавке сталей марок группы IF масса покровного шлака минимальная (зачастую она составляет около 80 мм или менее), поэтому поступлением кислорода от диссоциации оксидов шлака в металл можно пренебречь.

Выводы

1. По результатам анализа выявлено, что при вакуумной обработке происходит насыщение металла кислородом до 60 ppm за счет кислорода, который поступает в металл с транспортирующим газом аргоном.

2. Углерод в нераскисленном металле присутствует в виде оксидных и карбидных связей, часть которых легко поддается вакуумному обезуглероживанию металла, а другая часть остается неизменной.

Сведения об авторах

Кошкарлов Александр Андреевич – аспирант кафедры МиХТ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: alex_koshkarov@mail.ru

3. Контрольно-измерительные средства отображают общее содержание кислорода, который присутствует в металле в виде оксидных связей.

Список источников

1. Протасов А.В., Майоров А.И., Комолов И.В. Рациональный выбор оборудования для внепечной обработки стали в современном сталеплавильном цехе // *Черная металлургия: Бюл НТИ*, 2006.
2. Бигеев А.М., Бигеев В.А. *Металлургия стали: Теория и технология плавки стали*. М., 2000. 544 с.
3. Yu Huang, Guo-guang Cheng, Qiming Wang, Shijian Li & Wei-xing Dai. Mathematical model for decarburization of ultralow carbon steel during RH treatment. *Ironmaking & Steelmaking* 2019. Vol. 47. №6. Pp. 655-664.
4. Кудрин В.А. *Теория и технология производства стали*. М.: Мир, 2003. 528 с.
5. Shen-yang Song, Jing Li, Wei Yan, Yu-xiang Dai, Yang Liu. Comparative Study on the Cleanliness of Ultra-low Carbon Al-Killed Steel by Different Refining Processes. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2020. Vol.73, № 7. Pp. 1-11.
6. Морозов А.П., Агапитов Е.Б. *Совершенствование комплексной обработки стали в циркуляционных вакууматорах: монография*. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 73 с.
7. Новик Н.М. *Внепечная вакуумная металлургия стали*. М.: Наука, 1986. 250 с.
8. Поволоцкий Д.Я. *Раскисление стали*. М.: Металлургия, 1972. 208 с.
9. Кньюпель Г. *Раскисление и вакуумная обработка стали*. Ч. II. Основы и технология ковшовой металлургии: пер. с нем. М.: Металлургия, 1984. 414 с.
10. Разработка и использование компьютерных тренажеров в металлургии / Комолова О.А., Григорьевич К.В., Горкуша Д.В., Теребикина Д.О. // *Тяжелое машиностроение*. 2017. №1-2. С. 55-61.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

OXYGEN BALANCE DURING DECARBONIZATION IN A RH DEGASSER

Koshkarov Alexander A. – Graduate Student of the Department of Metallurgy and Chemical Technology, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: alex_koshkarov@mail.ru

Abstract. Currently, the main part of car body parts is made of IF steel (Interstitial Free) - steel without free embedding atoms, with a very low content of carbon and nitrogen in the solid solution (ferrite). Its carbon content is less than 0.003%. The article analyzes the melting of IF-steels carried out in the oxygen-converter shop with vacuum decar-

burization, deoxidation, and titanium alloying of the metal during metal vacuum in a RH-type vacuum unit. An analysis of previously smelted IF-steels was conducted, and based on it, a balance calculation of the change in carbon content in the metal during its decarburization in a vacuum was performed. The main part of the oxygen that dissolves in the liquid metal enters the metal when it is blown in an oxygen converter. In this case, the author identified additional sources of oxygen supply to the metal during vacuum treatment. The main additional source of oxygen can be considered to be oxygen, which enters along with the transporting gas - argon. It was also established that part of the dissolved carbon interacts with residual elements (chromium, titanium, vanadium, niobium, and others), which are present as carbides in the liquid solution of the metal.

Keywords: IF-steels, vacuuming, carbides, metal oxidation, argon purity

Ссылка на статью:

Кошкарлов А.А. Баланс кислорода при обезуглероживании в RH-вакууматоре // Теория и технология металлургического производства. 2025. №4(55). С. 4-8.

Koshkarov A.A. Oxygen balance during decarbonization in a RH degasser. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 55, no. 4, pp. 4-8.