

УДК 669.168

ТЕМПЕРАТУРЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ*

Заякин О.В., д.т.н., заведующий лабораторией стали и ферросплавов (zferro@mail.ru)
Ренёв Д.С., младший научный сотрудник (sense199@mail.ru)

Институт металлургии УрО РАН
(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

Аннотация. Термогравиметрическим методом определены температуры начала кристаллизации сплавов системы Fe–Ni–Cr–C–Si в зависимости от концентрации хрома и никеля. Комплексные ферросплавы содержат 0,2 – 21,0 % Ni (при Cr = 25 ÷ 28 %) и 0,5 – 45,0 % Cr (при Ni = 10 ÷ 11 %); примерно 2,0 % C и 0,3 % Si; остальное железо и примеси. Эти ферросплавы относятся к категории легкоплавких сплавов и обладают рациональными (1320 – 1400 °C) температурами кристаллизации с точки зрения применения для обработки стали в ковше. Повышение до 45 % содержания хрома в таких сплавах сопровождается интенсивным ростом температур начала кристаллизации.

Ключевые слова: температура плавления, хром, никель, ферросплав.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-568-570

Перспективным направлением получения ферросплавов, обладающих рациональными служебными характеристиками, является создание комплексных сплавов [1]. Для исследований выбраны образцы комплексных хромоникелевых ферросплавов, ориентированные на использование в интенсивно развивающемся производстве сталей нержавеющей марок [2]. Одним из факторов, сдерживающих массовое производство и потребление новых видов ферросплавов, является отсутствие сведений о потребительских характеристиках этих материалов [3], к которым в числе первых относятся температуры кристаллизации (плавления) [4]. Интервал плавления – одно из основных свойств ферросплавов, влияющих как на технологию их получения, так и на дальнейшее использование. Ранее была предложена схема, позволяющая условно разделять все ферросплавы на три группы: легкоплавкие, тугоплавкие, сверхтугоплавкие. Чтобы отнести ферросплав к той или иной группе, необходимо сопоставить температуру T_{ϕ} начала кристаллизации ферросплава, температуру $T_{\text{в}}$ стали в ковше и температуру $T_{\text{с}}$ конца кристаллизации: для легкоплавкого сплава $T_{\phi} < T_{\text{с}}$, для тугоплавкого $T_{\text{с}} < T_{\phi} < T_{\text{в}}$, для сверхтугоплавкого $T_{\phi} > T_{\text{в}}$. По данным работы [5] оптимальная температура начала кристаллизации ферросплавов, предназначенных для обработки стали, не должна превышать 1400 °C.

Температуру кристаллизации сплавов определяли методом фиксирования температурных кривых при охлаждении расплавов [6] на высокотемпературной

лабораторной установке. Образцы получены методом сплавления феррохрома и химреактивов (железа, никеля, кремния). Образцы помещали в алундовые тигли. Температуру измеряли вольфрам-ренийевыми термодатчиками ВР-5/20 с алундовыми наконечниками при помощи самописца Термодат-19М4. Во время замеров наконечник одной термодатчицы находился в центре расплава, а наконечник другой – в рабочем пространстве печи в непосредственной близости от тигля с расплавом.

Рабочее пространство печи нагревали на 50 – 100 °C выше предполагаемой температуры плавления сплава, после чего охлаждали со скоростью 10 – 15 °C/мин, при этом на кривых охлаждения фиксировали площадки. Первая площадка на кривой охлаждения соответствует температуре начала кристаллизации, вторая – температуре конца кристаллизации. Каждое измерение повторяли не менее трех раз. Ошибка измерения температуры не превышала 0,4 %. Содержание элементов в образцах определяли методами оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ОРТИМА 2100 DV) и инфракрасно-абсорбционного анализа (LECO CS-230) с использованием оборудования ЦКП «Урал-М». Химический состав исследуемых образцов представлен в таблице.

В образцах 1 – 5 системы Fe–Ni–Cr–C–Si изменяли содержание никеля при относительно постоянном содержании хрома, углерода и кремния. Показано, что при увеличении концентрации никеля во всем рассматриваемом интервале (0,2 – 21,0 %) наблюдается стабильное снижение (от 1387 до 1318 °C) температуры начала кристаллизации образцов с интенсивностью примерно 3,3 °C/% Ni.

* Работа выполнена по Государственному заданию Института металлургии УрО РАН в рамках Программы фундаментальных исследований государственных академий и по проекту РФФИ № 19-03-00451.

Химический состав исследуемых образцов

Chemical composition of the test samples

Образец	Содержание*, % (по массе)		$T_{\text{ф}}$, °C
	Ni	Cr	
1	0,2	26,1	1387
2	5,7	24,6	1346
3	11,0	27,5	1334
4	16,1	27,2	1324
5	21,1	24,5	1318
6	11,2	0,5	1371
7	10,8	36,7	1365
8	9,6	45,6	1400
9	10,0	55,0	1445

* Во всех образцах содержится примерно 2,0 % С и 0,3 % Si; остальное – железо и примеси.

В образцах 3, 6 – 9 изменяли количество хрома за счет концентрации железа. Выявлено, что повышение содержания хрома до 28 % в рассматриваемых комплексных ферросплавах приводит к плавному (1,4 °C/% Cr) снижению температур начала кристаллизации с 1371 до 1334 °C, а дальнейшее увеличение содержания хрома до 55 %, напротив, сопровождается интенсивным (4,0 °C/% Cr) ростом (до 1445 °C) температур начала кристаллизации. Качественно такая зависимость может объясняться поведением линии ликвидуса на диаграмме равновесного состояния двухкомпонентной системы Fe–Cr [7]. Согласно этой диаграммы увеличение содержания хрома до 21 % сопровождается снижением температуры ликвидуса на 25 °C, а дальнейшее повышение концентрации хрома приводит к росту температуры ликвидуса бинарного сплава.

Рассматриваемые комплексные сплавы с содержанием хрома более 45 % относятся к категории легкоплавких сплавов, так как обладают температурами

кристаллизации существенно ниже температуры конца кристаллизации обрабатываемой стали. Повышение (до 55 %) содержания хрома приводит к нежелательному увеличению (до 1445 °C) температуры начала кристаллизации комплексного сплава.

Выводы

Комплексные ферросплавы, содержащие 0,2 – 21,0 % Ni (при Cr = 25 ÷ 28 %) и 0,5 – 45,0 % Cr (при Ni = 10 ÷ 11 %); примерно 2,0 % C и 0,3 % Si, остальное – железо и примеси, относятся к категории легкоплавких сплавов и обладают рациональными (1320 – 1400 °C) температурами кристаллизации с точки зрения их применения для обработки стали в ковше.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Machulec B., Bialik W., Gil S. Application of the mining industry wastes as raw material for melting of the complex ferrous alloys // Archives of Metallurgy and Materials. 2018. Vol. 63. No. 2. P. 975 – 979.
2. Pariser H.H., Backeberg N.R., Masson O.C.M., Bedder J.C.M. Changing nickel and chromium stainless steel markets – A review // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. No. 6. P. 563 – 568.
3. Bao Y.-P., Zhang C.-J., Wang M. Situation and prospect on investigation of ferroalloy reduction during steelmaking // Chinese Journal of Engineering. 2018. Vol. 40. No. 9. P. 1017 – 1026.
4. Жучков В.И., Заякин О.В., Мальцев Ю.Б. Изучение температур плавления и плотности никельсодержащих ферросплавов // Расплавы. 2001. № 1. С. 7 – 9.
5. Жучков В.И., Носков А.С., Завьялов А.Л. Растворение ферросплавов в жидком металле. – Свердловск: изд. УрО АН СССР, 1990. – 134 с.
6. Физико-химические методы исследования металлургических процессов / П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев, М.Г. Крашенинников и др. – М.: Металлургия, 1988. – 511 с.
7. Ферросплавы / В.Г. Мизин, Н.А. Чирков, В.С. Игнатьев и др. – М.: Металлургия, 1992. – 415 с.

Поступила в редакцию 4 июня 2019 г.

После доработки 10 октября 2019 г.

Принята к публикации 22 октября 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 7, PP. 568–570.

CRYSTALLIZATION TEMPERATURES OF COMPLEX FERROALLOYS

O.V. Zayakin, D.S. Renev

Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Thermo-gravimetric method was used to determine the temperature of crystallization onset of alloys of the Fe–Ni–Cr–C–Si system depending on concentration of chromium and nickel. It was shown that complex ferroalloys containing 0.2 – 21.0 % Ni (at Cr = 25 – 28 %); 0.5 – 45.0 % Cr (at Ni = 10 – 11 %); 2.0 % C and 0.3 % Si, iron, and impurities belong to the category of low-melting alloys and have rational values (1320 – 1400 °C) of crystallization temperatures in terms of their use for steel processing in the ladle. An increase of the chromium content to more than 45 % in these alloys is accompanied by an intense increase of their temperatures of the crystallization onset.

Keywords: melting point, chromium, nickel, ferroalloy.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-568-570

REFERENCES

1. Machulec B., Bialik W., Gil S. Application of the mining industry wastes as raw material for melting of the complex ferrous alloys. Archives of Metallurgy and Materials. 2018, vol. 63, no. 2, pp. 975–979.
2. Pariser H.H., Backeberg N.R., Masson O.C.M., Bedder J.C.M. Changing nickel and chromium stainless steel markets – A review. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018, vol. 118, no. 6, pp. 563–568.

3. Bao Y.-P., Zhang C.-J., Wang M. Situation and prospect on investigation of ferroalloy reduction during steelmaking. *Chinese Journal of Engineering*. 2018, vol. 40, no. 9, pp. 1017–1026.
4. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Mal'tsev Yu.B. Study of melting temperatures and density of ferroalloys containing nickel. *Rasplavy*. 2001, no. 1, pp. 7–9. (In Russ.).
5. Zhuchkov V.I., Noskov A.S., Zav'yalov A.L. *Rastvorenie ferrosplavov v zhidkom metalle* [Dissolution of ferroalloys in liquid metal]. Sverdlovsk: UrO AN SSSR, 1990, 134 p. (In Russ.).
6. Arsent'ev P.P., Yakovlev V.V., Krashennnikov M.G. etc. *Fiziko-khimicheskie metody issledovaniya metallurgicheskikh protsessov* [Physico-chemical methods of metallurgical processes study]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 511 p. (In Russ.).
7. Mizin V.G., Chirkov N.A., Ignat'ev V.S. etc. *Ferrosplavy* [Ferroalloys]. Moscow: Metallurgiya, 1992, 415 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was carried out under the State Assignment of the IMET UB RAS within the framework of the Program of Fundamental Studies of State Academies and within the RFBR project No. 19-03-00451.

Information about the authors:

O.V. Zayakin, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Steel and Ferroalloys (zferro@mail.ru)

D.S. Renev, Junior Researcher (sense199@mail.ru)

Received June 4, 2019

Revised October 10, 2019

Accepted October 22, 2019
