

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОВШЕВОЙ ОБРАБОТКИ КОНВЕРТЕРНОЙ СТАЛИ ФЕРРОАЛЮМИНИЕМ*

Буга И.Д., Мельник С.Г., Белов Б.Ф., Троцан А.И., Паренчук
И.В., Онищенко А.А., Ковура А.Б., Гнедаш А.В.
ОАО «МК «Азовсталь», ИПМ НАН Украины, ООО «Фирма
«Уникон», Донецкий завод ферросплавов

В последнее время на металлургических предприятиях осваиваются технологии получения синтетических ферросплавов и лигатур из вторичного сырья для печной и ковшевой обработки стали. Это, в первую очередь, относится к алюминию и его сплавам для комплексного раскисления стали в связи с его дефицитом и высокой стоимостью электропечных ферросплавов промышленного производства.

Существуют три типа синтетических сплавов вторичного алюминия – плакированные, компактированные и литые. Плакированные сплавы типа КРА-30 содержат алюминиевый сердечник и металлическую (чугунную, стальную) оболочку, что позволяет предохранить от вторичного окисления алюминия шлаками и атмосферным кислородом и увеличить плотность сплава для более глубокого погружения его в жидкую сталь. Компактированные сплавы получают путем присадок твердых наполнителей в жидкий алюминий непосредственно в литейную форму-мульдошку. В качестве наполнителей используют дробленые материалы – отходы металла и ферросплавов. При сплавлении лома алюминиевого или стального и алюминиевого лома и разливки жидкого металла по литейным формам заданного типоразмера получают монолитные сплавы определенного состава. Технология производства литых сплавов наиболее рациональная, так как исключает многостадийность технологических операций плакированных и компактированных сплавов.

Стандартные сплавы вторичного алюминия – «чушковый» марки АВ-87 издавна применяются для ковшевой обработки стали. Однако из-за малой плотности ($\sim 2,7 \text{ г/см}^3$) они легко окисляются атмосферным кислородом и покровным шлаком, на поверхности которого расплавляются. Степень усвоения алюминия не превышает 10-15 %, что приводит к повышенному расходу алюминия и повышению себестоимости металла. Сплавы ферроалюминия

отличаются высокой однородностью и плотностью, близкой к плотности жидкого железа, что снижает потери на вторичное окисление алюминия, повышает степень усвоения в 1,5-2,0 раза и приводит к значительному снижению затрат на производство стали.

Промышленное производство ферроалюминия на предприятиях Донецка, Горловки, Тореза в объеме до 500 т/месяц по единым техническим условиям организовала фирма «Уникон» и поставляет эту продукцию на металлургические предприятия Донецка, Мариуполя, Макеевки, Енакиево и др., где используется ферроалюминий вместо чушкового алюминия АВ-87.

Проведенные системные исследования сплавов железо-алюминий в ИПМ НАН Украины дали возможность оптимизировать составы сплавов, разработать рациональные способы их выплавки и эффективные способы обработки жидкой стали алюминием, которые защищены патентами Украины на изобретения и полезные модели (№45937, 9593, 9970, 11857 и др.), принадлежащие к интеллектуальной собственности фирмы «Уникон».

На основании проведенных исследований было установлено, что эффективность синтетических сплавов для раскисления стали зависит от многих факторов и, в первую очередь, от структурно-химического состояния алюминия и его сплавов при температурах жидкой стали. В рамках разрабатываемой феноменологической теории строения металлургических фаз по модели гармонических структур вещества [2] для внепечной обработки стали эффективность ферросплавов и лигатур определяется их химическим и фазовым составом в зависимости от природы исходных компонентов сплава, а именно: сплавы тугоплавких компонентов отвечают эвтектическим составам, сплавы легкоплавких компонентов – химическим соединениям (интерметаллидам) с конгруэнтным плавлением, отвечающих сингулярным точкам ликвидуса на диаграммах состояния заданных металлических систем.

Для оптимизации сплавов ферроалюминия проведен структурно-химический анализ сплавов ферроалюминия с помощью полигональной диаграммы состояния бинарной системы железо-алюминий, построенной с помощью нового графо-аналитического метода [3], для твердых и жидких исходных компонентов во всем интервале концентраций твердых и жидких исходных компонентов. На рисунке представлена полигональная диаграмма состояний, в таблице 1 – классификация системы железо-алюминий.

Таблица 1 Классификация системы железо-алюминий

№ п/ п	Линей- ные систем ы	Промежуточные фазы					Температура, °С		ρ, г/см ³
		Химические реакции	Химиче- ские формул ы	Услов- ные обозна- чения	[Al] _{Fe₃} масс. %	Fe Al	Обра-зова-ния	Плав-ления	
1	Fe-Al	Fe + 2Al ↔ FeAl ₂ 2FeAl ₂ ↔ FeAl + FeAl ₃	FeAl ₂	1.2 (2A)	49,1	1,04	<u>550</u> н.д.	<u>1100</u> 1100	5,30
2	Fe- FeAl ₂	Fe + FeAl ₂ ↔ 2(FeAl) 3(FeAl) ↔ Fe ₂ Al + FeAl ₂	FeAl	1.1 (BA)	32,5	2,07	<u>770</u> н.д.	<u>1300</u> н.д.	6,15
3	Fe- FeAl	2Fe + FeAl ↔ Fe ₃ Al 2(Fe ₃ Al) ↔ Fe ₄ Al + Fe ₂ Al	Fe ₃ Al	3.1 (3B)	13,8	6,22	<u>900</u> н.д.	<u>1400</u> н.д.	7,10
4	Fe- Fe ₃ Al	Fe + Fe ₃ Al ↔ Fe ₄ Al 3(Fe ₄ Al) ↔ Fe ₆ Al + +2(Fe ₃ Al)	Fe ₄ Al	4.1 (4B)	10,8	8,3	<u>1200</u> н.д.	<u>-</u> н.д.	7,29
5	Fe- Fe ₄ Al	2Fe + Fe ₄ Al ↔ Fe ₆ Al Fe ₆ Al ↔ 3Fe + Fe ₃ Al	Fe ₆ Al	6.1 (6B)	7,4	12,4	<u>1400</u> н.д.	<u>-</u> н.д.	7,42
6	FeAl- Fe ₃ Al	FeAl + Fe ₃ Al ↔ 2(Fe ₂ Al)	Fe ₂ Al	2.1 (2B)	19,4	4,15	<u>1110</u> н.д.	<u>-</u> н.д.	6,81
7	Al- FeAl ₂	38Al + FeAl ₂ ↔ FeAl ₄₀	FeAl ₄₀	1.4 (Э)	95,1	0,05	<u>600</u> 600	<u>600</u> 600	2,95
8	FeAl ₂ - FeAl ₄₀	17FeAl ₂ + 2FeAl ₄₀ ↔ 19FeAl ₆	FeAl ₆	1.6 (6A)	74,3	0,35	<u>700</u> н.д.	<u>-</u> н.д.	4,00
9	FeAl ₂ - FeAl ₆	18(FeAl ₂) + FeAl ₄₀ ↔ 19(FeAl ₄)	FeAl ₄	1.4 (4A)	65,9	0,52	<u>800</u> н.д.	<u>800</u> н.д.	4,44
10	FeAl ₂ - FeAl ₄	FeAl ₂ + FeAl ₄ ↔ 2(FeAl ₃)	FeAl ₃	1.3 (3A)	59,1	0,69	<u>950</u> н.д.	<u>950</u> н.д.	4,79

В бинарной системе Fe-Al образуется при температуре 550 °С первичная промежуточная фаза FeAl₂ (49,1/50,9 %), плавящаяся конгруэнтно при 1100 °С и разделяющая систему на две квазибинарные подсистемы FeAl₂-Fe и FeAl₂-Al, в которых последовательно образуется ряд вторичных промежуточных фаз – алюминидов железа. В подсистеме FeAl₂-Fe: FeAl (1.1/BA, 67,5/32,5; 770/1300) → Fe₂Al (2.1/2B, 80,6/19,4; 1100/-) → Fe₃Al (3.1/3B, 86,2/13,8; 900/1400) → Fe₄Al (4.1/4B, 89,2/10,8; 1200/-) → Fe₆Al (6.1/6B, 92,6/7,4; 1400/-) и Э(4,9/95,1; 600/600) → FeAl₆ (1.6/6A, 25,7/74,3; 700/700) → FeAl₄ (1.4/4A, 34,1/65,9; 800/800) → FeAl₃ (1.3/3A, 40,9/59,1; 950/950). Здесь в скобках по порядку указаны условные обозначения, состав (%), температуры образования и плавления, прочерк – отсутствие точки плавления. Промежуточные фазы – интерметаллиды: Fe₃Al → FeAl → FeAl₂ → FeAl₃ → FeAl₄ → FeAl₆ плавятся конгруэнтно в сингулярных точках линии ликвидус, проведенной линией B₅ → 3B⁰ → BA⁰ → 2A⁰ → 3A → 4A → 6A → Э → A₂. По справочным данным [4] известны шесть химических соединений: Fe₃Al → FeAl → FeAl₂ → Fe₂Al₅ → FeAl₃ → Fe₂Al₇, из которых конгруэнтной точкой плавления (~1200 °С) обладает только интерметаллид Fe₂Al₅. На классической диаграмме, кроме того, не показаны температуры образования интерметаллидов и области их гомогенности, что не позволяет оценить термическую стабильность и характер распада (разрушения) сплавов при длительном хранении.

Сингулярные фазы, образующиеся на линии ликвидус, отличаются высокой термодинамической прочностью, сохраняются в жидком состоянии в области гомогенности жидкого раствора и отвечают оптимальным составам ферроалюминия. Области гомогенности жидких интерметаллидов обозначены: L_{3B}(B₆-3B⁰-BA⁰) для Fe₃Al, L_{BA}(B₇-BA⁰-A₇) для FeAl, L_{2A}(2A⁰-BA⁰-A₆) для FeAl₂, L_{3A}(2A⁰-3A-A₅) для FeAl₃, L_{4A}(3A⁰-4A-A₄) для FeAl₄, L_{6A}(4A⁰-6A-A₆) для FeAl₆ и Э_ж (6A-Э-A₂). Для чистых компонентов в жидком состоянии обозначены критические точки, ограничивающие полиэдрические, полигональные и разупорядоченные растворы: L_B^{III}(B₅ - 3B⁰ - B₆), L_B^{III}(B₆ - 6A⁰ - B₇) на основе железа и L_A^{III}(A₂ - 6A - A₃), L_A^{III}(A₃ - 4A - A₄), L_A^{III}(A₄ - 3A - A₅), L_A^{III}(A₅ - 2A⁰ - A₆), L_A^{III}(A₅ - 2A⁰ - A₆) - на основе алюминия. Выше линии B₇- A₆ (1800-1300 °) находятся разупорядоченные растворы (L_{раз}). В области гомогенности образуются непрерывные (регулярные) жидкие растворы, в которых сохраняется химическая (металлическая) связь железо-алюминий, способствующая снижению химической активности алюминия. Это

позволяет снизить угар алюминия и оптимизировать сплавы ферроалюминия для предварительного раскисления стали – сплавы типа фераль ФА (15-20), для окончательного раскисления – сплавы типа ФА (30-50) и для химической закупорки слитков стали – сплавы типа ФА (60-70).

Сплавы вторичного алюминия – фераль (ферроалюминий) различных марок, изготовленные по ТУ У 27.3-13533123-001-2004, разработанных фирмой «Уникон», испытаны в мартеновском цехе Макеевского металлургического завода, в конвертерном цехе Енакиевского металлургического завода и на других заводах Украины, а также в конвертерном цехе ОАО «МК «Азовсталь» и везде получены положительные результаты при замене чушкового алюминия АВ-87.

На МК «Азовсталь» постоянно проводятся работы по усовершенствованию ковшевой обработки стали с целью снижения удельного расхода чушкового алюминия [5]. В 80-е годы прошлого века впервые в практике отечественного производства стали разработали и внедрили способ и установку для ввода в стальковш слитков вторичного алюминия массой 400-450 кг после выпуска плавки, что позволило сократить расход алюминия с 2,7 кг/т до 2,0 кг/т.

При обработке жидкого металла в стальковше чушковым алюминием последний расходуется, как было ранее установлено [5], по трем основным статьям: на окисление атмосферным кислородом 20-25 %, на окисление покровным шлаком 55-60 %, и собственно, на раскисление металла остается не более 20 %. Применение погружных слитков повышает степень усвоения алюминия в металле, но снижает степень десульфурации до 10-20 % за счет повышенной окисленности ковшевого шлака. Технология двухстадийного раскисления стали, разработанная на комбинате, включающая присадку чушкового алюминия при выпуске металла (30-50 %) и остальное – слитком массой 250-270 кг после выпуска, позволяет сократить удельный расход алюминия на 0,4 кг/т и повысить степень десульфурации до 35-55 %. Замена чушкового алюминия на ферроалюминий марки ФА-30 или РА-30 позволяет сократить расход алюминия до 1,5-1,7 кг/т при той же степени десульфурации до 50 %.

В настоящее время разработана и внедрена новая технология трехстадийного раскисления конвертерной стали, включающая присадку в сталеразливочный ковш кремнийсодержащих ферросплавов, шлакообразующих смесей (ТШС) и алюминия, который в виде ферроалюминия (фераль) ФА30-35 дают

последовательно для предварительного раскисления стали (25-40 %), чушки вторичного алюминия (10-30 %) для раскисления покровного шлака и окончательное раскисление – литые блоки вторичного алюминия массой ~250 кг. Причем, предварительное раскисление стали проводят в начале выпуска плавки перед присадкой ТШС, раскисление покровного шлака – после присадок ТШС, окончательное раскисление и легирование стали – после выпуска металла. Для раскисления покровного шлака вместо чушек вторичного алюминия разрешается применять гранулированный алюминий или высоколегированный дробленый фераль (ФА 50-60 %) или сифераль (СФА 15-50).

При использовании дробленного ФА35 фракцией 20-50 мм в соответствии с требованиями ТУк 232-349-2004 присаживают в стальковш вместе с ТШС в регламентированных количествах в зависимости от содержаний углерода на повалке. При концентрациях углерода повалки 0,05-0,06 % массовый расход (кг/плавка) ФА35 составляет 400-490 + 70-110 АВ87. Степень усвоения алюминия для судовых сталей достигает 25-30 % при удельном расходе 1,40-1,45 кг/т, что дает экономический эффект 5,0-8,0 грн/т стали в рыночных ценах 2005 года.

Таким образом, выполнен структурно-химический анализ сплавов железо-алюминий с помощью полигональной диаграммы состояния Fe-Al, построенной новым графо-аналитическим методом, определены оптимальные составы ферроалюминия для раскисления стали и шлака и разработана комплексная технология трехстадийной ковшевой обработки стали алюминием в виде различных изделий (чушки, гранулы, блоки), позволяющая сократить удельный расход алюминия с 2,3 кг/т до 1,40-1,45 кг/т и получить экономию 5-8 грн/т стали.

Литература

1. Удовиченко Ю.Н. Ферроалюминий – новый ферросплав для черной металлургии / Ю.Н.Удовиченко, А.А. Онищенко, И.В. Паренчук, В.В. Паренчук // Энергосбережение.- 2004.- №8.- С.12-16.
2. Белов Б.Ф. Структуризация металлургических фаз в жидком и твердом состояниях / Б.Ф.Белов, А.И.Троцан, П.С.Харлашин // Изв. ВУЗов, ЧМ.- 2002.- №4.- С.70-75.
3. Белов Б.Ф. Свідоцтво про державну реєстрацію прав автора на твір. ПА №2825 від 29.02.2000 р. Методика построения полигональных диаграмм состояния бинарных металлургических систем. Белов Б.Ф., Троцан А.И., Харлашин П.С., Крейденко Ф.С.

