

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН**

ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Аубакирова Макпал Буркутовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФЕРРОСИЛИКОАЛЮМИНИЯ НА
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ ПРИ ВНЕПЕЧНЫХ
СПОСОБАХ ПОЛУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПФ ТОО "КАСТИНГ"**

Магистерская диссертация на соискание академической степени магистра
химической технологии неорганических веществ
по специальности 6М072000 – «Химическая технология неорганических
веществ»

ПАВЛОДАР – 2014

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Инновационный Евразийский университет

Допущен (а) к защите:
зав. кафедрой «Химия и
металлургия»,
кандидат химических наук,
и.о.профессора,
_____ А.Н.Жакупова
(подпись)
« ____ » _____ 20 __ г

Магистерская диссертация

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФЕРРОСИЛИКОАЛЮМИНИЯ НА
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ ПРИ ВНЕПЕЧНЫХ
СПОСОБАХ ПОЛУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПФ ТОО"КАСТИНГ"**

специальность: 6М072000 – «Химическая технология неорганических
веществ»

Магистрант

(подпись)

М.Б. Аубакирова

(инициалы, фамилия)

Научный руководитель,
доктор химических наук

(подпись)

А.К. Свидеркий

(инициалы, фамилия)

ПАВЛОДАР – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	4
1	Химический состав стали	6
1.1	Влияние газов на свойства стали	10
1.2	Технологические свойства стали	13
1.3	Классификация сталей	16
2	Сущность процесса получения сталей	18
3	Ферросплавы	22
3.1	Общие требования к качеству сталей	26
3.2	Виды ферросплавных процессов	30
4	Ферросилиций	38
4.1	Явление рассыпания ферросилиция	38
4.2	Сортамент ферросилиция	39
4.3	Сырые материалы для выплавки ферросилиция	39
4.4	Технология получения ферросилиция	41
5	Экспериментальная часть	47
5.1	Ферросиликоалюминий	47
5.2	Свойства алюминия и его соединения	51
5.3	Сырые материалы для выплавки ферросиликоалюминия	56
5.4	Термодинамические основы для получения ферросиликоалюминия	56
5.5	Технология получения ферросиликоалюминия	58
5.6	Применение ферросиликоалюминия в черной металлургии	59
5.7	Расчет экономической эффективности	61
6	Охрана окружающей среды	63
	Заключение	67
	Список использованных источников	68

ВВЕДЕНИЕ

В связи с ростом экономики Республики Казахстан, увеличиваются темпы роста металлургической промышленности. Как известно, при производстве стали широко применяют ферросплавы, которые используются как легирующие добавки для улучшения качества металлов.

Производство ферросплавов неразрывно связано с общим уровнем развития металлургической промышленности, особенно с производством высококачественных легированных сталей.

В настоящее время на ПФ ТОО «KSP Steel» реализуется проект по организации ферросплавного производства по выпуску ферросиликоалюминия. Сортамент продукции может варьироваться в широких пределах, в зависимости от потребности потенциальных потребителей. Срок реализации проекта 2013-2014 гг.

Прогнозируемая потребность в данном продукте только у предприятий СНГ составляет до 200 тысяч тонн в год. Большой спрос на ферросиликоалюминий объясняется тем, что он полностью превосходит и заменяет традиционные сплавы — ферросилиций и алюминий — при производстве рядовых марок стали на металлургических комбинатах. По оценкам специалистов, при использовании сплава экономия на производстве стали достигает \$3 на тонну продукции.

Современный уровень развития техники требует значительного расширения сортамента и повышения качества специальных сталей, что осуществимо только при наличии в стране высокоразвитого производства ферросплавов.

За короткий период своего существования отечественное производство ферросплавов стало одной из передовых отраслей промышленности, полностью удовлетворяющей потребности нашей металлургии.

Дальнейшее усовершенствование технологии производства ферросплавов, а также создание новых технологических процессов возможно при условии глубокого изучения теоретических основ получения сплавов.

В современном индустриальном обществе сталь, благодаря широкому спектру целенаправленно регулируемых свойств, оптимальному соотношению цены и качества, хорошей способности к утилизации, остается базовым материалом стабильного развития общества. Сталь находит широкое применение во всех важнейших отраслях промышленности: строительстве высотных зданий, энергетике и экологической технике, транспорте, машино- и мостостроении, автомобилестроении и бытовой технике [1].

Сталь - это конструкционный материал, обладающий комплексом уникальных физико-технических, технологических и эксплуатационных свойств, что создает этому материалу наиболее широкую область применения. В соответствии с ускоряющимися темпами развития общества, его индустриализации, растет потребление и производство стали в мировой металлургии.

Вместе с тем, на мировом рынке уже длительное время сложилась ситуация, когда цены на сырье, материалы, энергоносители, рабочую силу растут быстрее, чем цены на металлопродукцию. Такая диспропорция заставляет металлургов для сохранения конкурентоспособности изыскивать новые пути совершенствования технологии, оборудования и, в целом, изменения принципов получения конечного продукта с меньшими затратами. В то же время и потребительские требования растут опережающими темпами.

В этих условиях трансформируется сама концепция производства стали.

Целью работы является исследование влияния ферросиликоалюминия на физико-химические свойства стали при внепечных способах получения в условиях ПФ ТОО "Кастинг".

В процессе плавки стали кислород ухудшает качество металла. Для избежания этого и извлечения кислорода из расплава применяют методику, называемую раскислением стали. То есть в ее расплавленную массу добавляют ферросилиций и алюминий в чушках. Технологии получения алюминия и ферросилиция являются энергоемкими и требуют больших затрат при подготовке сырья к плавке чушкового алюминия. Уникальность работы состоит в том, что Павлодарский ферросиликоалюминий значительно снижает затраты энергии и расход ферросиликоалюминия, да и сама выплавляемая сталь получается более качественной.

Научная новизна темы состоит в том, что данная разработка решает не только технологические задачи выплавки высококачественной стали, но и экологические, так как ферросиликоалюминий получают из экибастузского низкосортного высокосольного угля, который идет в отвалы, нанося урон окружающей среде. А теперь из четырех тонн такой "породы" выходит тонна дефицитного "казахстанского сплава".

Практическая значимость исследования состоит в опробовании опытно-промышленной партии ферросиликоалюминия марок ФС55А10 и ФС65А10 производства ПФ ТОО "KSPSteel" применяемого в качестве заменителя ферросилиция, а также материала улучшающего механические свойства стали.

В данной работе были поставлены следующие задачи:

- провести теоретический анализ использования ферросплавов в производстве стали;
- рассмотреть основные сферы использования сплавов ФСА. Определить равновесные температуры восстановления углеродом оксидов металлов, входящих в состав ферросиликоалюминия;
- провести промышленные испытания в цеховых условиях и сравнить полученные результаты;
- рассчитать экономическую эффективность применения в производстве стальной продукции ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и ФС65А10 ПФ ТОО "Кастинг";
- рассчитать прибыль металлургического производства при замене одного ферросплава на другой.

1 Химический состав стали

Сталь представляет собой сплав железа с углеродом; в этот сплав входят в некотором количестве другие элементы, специально вводимые в процессе выплавки, а также неизбежные или случайные примеси.

В обычных углеродистых сталях содержание углерода колеблется в пределах от 0,1 % до 1,7%, В специальных сталях его содержание может быть уменьшено ниже 0,1% и повышено до 2,0%. Наличие **углерода в стали** определяется его содержанием в исходных шихтовых материалах и в первую очередь в чугуна — основном материале, используемом для передела на сталь. В процессе выплавки регулируется содержание в стали углерода.

Одновременно с углеродом шихтовые материалы вносят марганец, кремний, серу, фосфор и мышьяк, свинец и олово.

Марганец и кремний в процессе выплавки стали окисляются и в большей своей части удаляются из стали, однако будучи раскислителями, т.е. элементами, обеспечивающими удаление из нее растворенного кислорода, вновь вводятся в конце плавки в виде специальных добавок — ферросплавов. В углеродистой и ряде других специальных сталей для обеспечения им необходимых механических и физических **свойств** эти элементы используют в качестве легирующих добавок. И обычной углеродистой стали содержание марганца колеблется в пределах от 0,40 до 0,80%, а кремния **от** 0,3 до 0,4%.

Сера, фосфор, мышьяк, сурьма, олово, свинец и медь являются примесями, характеризующими природу того или иного чугуна [2].

Сера, помимо чугуна и других шихтовых материалов, вводится в сталь с топливом. Сера и фосфор в сталь входят в количествах до 0,03 - 0,07% и будучи вредными примесями, понижающими качество стали, удаляются в процессе ее выплавки.

Мышьяк, сурьма, свинец и другие элементы, имеющиеся в чугунах и в прочих шихтовых материалах (оборотный лом), входят в сталь в незначительных количествах (до 0,003%). Однако любое, даже минимальное содержание этих элементов резко снижает качество металла. Будучи легкоплавкими, они в процессе затвердевания располагаются тончайшими пленками между зёрнами, чем и снижают пластические свойства стали. До настоящего времени нет методов, обеспечивающих в процессе плавки удаление указанных элементов и поэтому, для специальных сталей приходится подбирать материалы, не содержащие этих элементов.

В сталь в процессе переплава оборотного лома могут быть введены никель, хром и медь.

Для придания стали необходимых механических и физико-химических свойств в нее вводятся специальные элементы: кремний, марганец, хром, никель, вольфрам, молибден, ванадий, титан, кобальт, цирконий, церий, кальций, алюминий и т. д.

Таким образом, даже простая углеродистая сталь содержит значительное количество различных случайных и специально введенных примесей. Наличие

в стали большого количества растворенных в ней элементов усложняет ее производство, так как каждый из элементов по-разному влияет на технологические свойства [3].

Многообразие вариантов химического состава стали, применяемой в машиностроении, вынудило систематизировать и классифицировать их по маркам и классам.

Влияние химического состава стали на ее свойства представляет собой сложный вопрос. В данном разделе можно дать лишь общую оценку значения некоторых компонентов.

Углерод повышает прочность и понижает пластичность стали.

Марганец повышает твердость, предел прочности и предел текучести стали и одновременно понижает величины относительного сжатия, удлинения и ударной вязкости.

В стали с высоким содержанием углерода необходимо снижать количество марганца до 0,4 - 0,5%, так как углерод усиливает отрицательное влияние марганца на пластические свойства.

Марганец в железоуглеродистых сплавах расширяет область γ -твердого раствора и снижает точку $A_{с3}$. Он образует твердые растворы замещения с α - и γ -Fe, значительно упрочняет феррит (α -Fe) и повышает прокаливаемость углеродистой стали. В цементите Fe_3C марганец частично замещает железо.

Повышение содержания углерода при данном содержании марганца облегчает получение мартенситной или аустенитной структуры стали.

Так же, как и марганец, кремний является одной из важных примесей стали. В обычных сталях верхний предел содержания кремния не превышает 0,4%, поэтому большого влияния на свойства углеродистой стали кремний оказать не может.

Кремний сужает область γ -Fe и растворяется в цементите до 5%. При содержании кремния более 1,7% сталь, в зависимости от содержания углерода, приобретает однофазное ферритное строение при всех температурах.

Легирующее действие кремния следует рассматривать только при содержании его в стали больше 0,5%. Обычное содержание кремния в пределах 0,2—0,4% обеспечивает только полноту раскисления и успокоения стали и улучшает ее жидкотекучесть. При содержании углерода выше 0,5% кремний в количестве 1,5 - 2% вызывает графитизацию стали при отжиге.

Сера является постоянной примесью стали. С железом она образует химическое соединение FeS — сернистое железо, температура плавления которого равна $1193^\circ C$. Марганец с серой дает аналогичное соединение — сернистый марганец MnS с температурой плавления $1620^\circ C$. Сера, кроме этих соединений, образует с алюминием сернистый алюминий с температурой плавления $1100^\circ C$. В жидком металле сернистое железо растворяется хорошо, сернистый марганец слабо. Сталь, содержащая значительное количество сернистых включений, подвержена красноломкости или хрупкости при высоких температурах. В отливках из стали с повышенным содержанием серы образуются трещины. Влияние серы на красноломкость стали многие

металловеды объясняют образование сплава, который начинает плавиться при 985° С. Это, однако, нельзя считать верным, так как красноломкость сернистой стали проявляется наиболее ярко при температурах ниже 850°С, а при повышении температурыковки до 900° С красноломкость не проявляется. При наличии достаточного количества марганца в стали в ней образуется сернистый марганец, имеющий более высокую температуру плавления, чем сталь. Благодаря этому включения сернистого марганца застывают раньше стали и остаются не на границах, а внутри зерен.

Тугоплавкое соединение серы с марганцем предохраняет сталь от красноломкости, но, будучи неметаллическим включением, оно может оказать вредное влияние на пластические свойства металла. Ударные нагрузки при чередовании напряжений приводят к дроблению и частичному выкрашиванию хрупких сернистых включений, что и вызывает образование в отливке трещин.

Вредное влияние серы на пластические свойства стали увеличивается с повышением содержания в ней углерода. С увеличением отношения содержащихся в стали марганца и серы механические свойства стали повышаются. Так, с увеличением в стали величины отношения $Mn : S$ с 5 до 30, относительное удлинение и предел прочности при растяжении заметно повышаются [4].

Фосфор образует твердый раствор в феррите и повышает тем самым его хрупкость, особенно при низких температурах. Повышенное содержание фосфора, обладающего высокой способностью к ликвации снижает пластические свойства и ударную вязкость стали. С увеличением содержания фосфора повышается предел прочности металла при растяжении.

Никель, образуя твердый раствор с γ -Fe, увеличивает прочность феррита и сравнительно мало понижает его пластичность. Никель повышает предел упругости более интенсивно, чем предел прочности. Он является незаменимым элементом для массивных и сложных отливок с высокой ударной вязкостью при низких температурах, не допускающих резкого охлаждения при термической обработке.

В сталях перлитного класса хром повышает прокаливаемость, пределы текучести и прочности, придает стали вязкость и износостойкость при повышенном содержании углерода.

Детали из хромистой стали с 0,45—0,60% С и 1,0—1,5% Cr при износеударной нагрузки работают даже лучше, чем детали из Г13Л. Высокая износоустойчивость хромистой стали основана на ее высокой начальной твердости. Как конструкционный материал низколегированная хромистая сталь может применяться лишь для отливок с толщиной стенок не более 80 мм. Для более массивных отливок используют хромомолибденовую сталь.

Среднелегированные хромистые стали обладают специальными физическими свойствами. Так, сталь с 5% С обладает значительной стойкостью против действия водорода и сероводорода при температуре 500—600° С и высоком давлении, высокой прочностью при повышенных температурах и хорошо сопротивляется коррозии в морской воде. Для получения хороших

показателей прочности и пластичности содержание углерода в стали с 5% Cr должно быть не выше 0,25%.

Хром в количестве 12% и выше сообщает стали высокие антикоррозионные свойства во влажном воздухе, водяном паре и некоторых других средах. При увеличении содержания его в стали выше 12% на поверхности отливок образуется защитная пленка окислов хрома как в условиях высоких температур, так и при корродирующем действии различных сред.

Стали, легированные совместно никелем и хромом, разделяются на следующие группы:

а) стали перлитного и мартенситного класса; их применяют главным образом в качестве конструкционного материала;

б) стали аустенитного класса; используются для кислотоупорных и жароупорных отливок, обладающих повышенными механическими свойствами;

в) стали без фазовых превращений (аустенитная или ферритная); предназначаются для отливок с высокой жаростойкостью;

г) стали феррито-карбидного класса (высокое содержание хрома и углерода и низкое — никеля); применяются для жаростойких отливок, не подвергающихся большому нагружению;

д) стали аустенитно-карбидного класса, обладающие специальными химическими свойствами.

Составы хромоникелевых сталей, применяющихся в современной промышленности, весьма разнообразны. Они легируются дополнительно молибденом, ванадием, титаном, марганцем и кремнием, кобальтом, селеном и пр.

Молибден в комбинации с хромом, а также с хромом и никелем наиболее сильно повышает прокаливаемость стали, предел текучести, но главное отличительное свойство молибдена (и вольфрама) — это понижение чувствительности стали к отпускной хрупкости и повышение сопротивления ползучести.

Ванадий сообщает любой легированной стали более мелкозернистое строение при первичной кристаллизации. Ванадий образует в стали прочные карбиды и нитриды.

Вольфрам как легирующий элемент применяется при изготовлении отливок для литого инструмента.

Вольфрам обеспечивает «красностойкость» литого инструмента, т. е. сохранение твердости при нагреве до 600° С.

Титан связывает углерод в трудно растворимый карбид. На этом основано применение титана в качестве средства против межкристаллитной коррозии кислотоупорной стали (18% Cr и 8% Ni). При медленном охлаждении или нагреве этой стали в ней выпадают карбиды хрома по границам зерен из твердого γ -раствора, поэтому приграничный слой зерна обедняется хромом. Карбиды по границам зерен и приграничный металл образуют гальваническую пару; при смачивании ее электролитом возникают местные электроток, под влиянием которых приграничный слой растворяется и тем самым теряется связь

между зернами. При введении титана в сталь углерод связывается в прочные карбиды титана, рассеянные по всему объему металла, а не по границам зерен, и таким образом карбиды хрома не могут образоваться и выпасть по границам зерен.

Селен улучшает обрабатываемость хромоникелевых нержавеющей сталей и вводится вместо серы в отливки для улучшения обрабатываемости их резанием. Добавление в некоторые стали селена в количестве 0,20 - 0,30% уже заметно повышает их обрабатываемость.

Селен оказывает малое влияние на механические свойства стали при комнатной температуре. При повышенных температурах селенсодержащая сталь несколько прочнее, но менее пластична, чем сталь без селена [5].

1.1 Влияние газов на свойства стали

Кислород. Кислород является вредной примесью в стали, так как с увеличением его содержания понижаются ее пластические свойства.

Сталь с повышенным содержанием кислорода становится при низких температурах хрупкой. Кислород сообщает стали красноломкость подобно сере. Обычно кислород содержится в стали в виде окислов, т. е. в виде неметаллических включений. Кислород понижает растворимость сернистого железа и тем самым усиливает влияние серы, так как FeS выделяется из раствора с образованием вокруг зерен стали легкоплавкой сернистой оболочки. Кислород вместе с серой повышает склонность литой стали к образованию горячих трещин, снижая и без того малую прочность при температурах 1400 - 1380° С.

Азот. Азот повышает твердость и прочность стали и одновременно понижает ее пластичность. Азот должен быть отнесен к вредным примесям стали. Однако при соответствующем измельчении первичного зерна стали, что происходит с введением в сталь алюминия, ванадия или титана, ударная вязкость стали с повышением содержания азота повышается.

Водород. Водород также относится к вредным примесям стали, с повышением содержания водорода резко снижаются пластические свойства стали при незначительном улучшении прочности. Повышение содержания в стали водорода приводит к «ситовидной» пористости отливок. Особенно вредно наличие водорода в легированных хромоникелевых сталях, где он вызывает образование «флокенов» (концентрических мелких трещин), приводящих к браку отливок и поковок [6].

Сталь, её свойства. Сталь - сплав железа с углеродом (FeC) до 2,14 %. Свойства стали подразделяются на:

- физические;
- химические;
- механические;
- технологические;
- эксплуатационные.

Эти свойства необходимо учитывать при выборе материала в зависимости

от условий работы деталей и конструкций.

К физическим свойствам металлов и сплавов относят: цвет; температуру плавления; плотность; температурные коэффициенты линейного и объёмного расширения; электросопротивление и электропроводимость.

Физические свойства сплавов обусловлены их составом и структурой. Например: температура плавления вольфрама - 3380°C; тантала - 2996°C; железо -1539°C. Самую низкую температуру плавления имеет ртуть (-38,87°C). К легкоплавким относят - олово, свинец, цинк.

К химическим свойствам относятся способность к химическому воздействию с агрессивными средами, а также антикоррозионные свойства.

К механическим свойствам относят прочность, пластичность, ударную вязкость, усталостную прочность, ползучесть, твердость и износостойкость.

Внешняя нагрузка вызывает в твердом теле напряжение и деформацию. Напряжение - это сила, отнесенная к площади поперечного сечения, МПа:

$$\sigma = P / F, \quad (1)$$

где P- сила, МН;

F - площадь поперечного сечения, м².

Деформация - это изменение формы и размеров тела под влиянием воздействия внешних сил или в результате процессов, возникающих в самом теле (например: фазовых превращений, усадки и т.п.). Деформация может быть упругая (исчезающая после снятия нагрузки). При увеличении нагрузки упругая деформация переходит в пластическую; при дальнейшем повышении нагрузки происходит разрушение тела.

Прочность - это способность твердого тела сопротивляться деформации или разрушению под действием статических или динамических нагрузок. Прочность определяют с помощью специальных механических испытаний образцов, изготовленных из исследуемого материала.

Для определения прочности при статических нагрузках образцы испытывают на растяжение, сжатие, изгиб и кручение. Испытания на растяжение обязательны. Прочность при статических нагрузках оценивается временным сопротивлением σ_B и пределом текучести σ_T ; σ_T - это условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца; σ_T - напряжение, при котором начинается пластическое течение металла.

Прочность при динамических нагрузках определяют по данным испытаний: на ударную вязкость (разрушение ударом стандартного образца на копре), на усталостную прочность (определение способности материала выдерживать, не разрушаясь, большое число повторно-переменных нагрузок), на ползучесть (определение способности нагретого материала медленно и непрерывно деформироваться при постоянных нагрузках).

Пластичность - это способность материала получать остаточное

изменение формы и размеров без разрушения. Пластичность характеризуется относительным удлинением δ при разрыве:

$$\delta = \frac{l-l_0}{l_0} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где l - длина образца после разрыва, мм;
 l_0 - первоначальная длина образца, мм.

Твердость - это способность материала сопротивляться внедрению в него другого, более твердого тела, не получающего остаточных деформации. Значение твердости и её размерность для одного и того же материала зависят от применяемого метода измерения. Значения твердости определенные различными методами, пересчитывают по таблицам и эмпирическим формулам.

Например, твердость по Бринеллю (НВ, МПа) (рисунок 1) определяют из отношения нагрузки P , приложенной к шарiku, к площади поверхности полученного отпечатка шарика $F_{отп}$:

$$HB = P/F_{отп}, \quad (3)$$

где F - площадь сферического отпечатка.

$$F = \frac{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}. \quad (4)$$

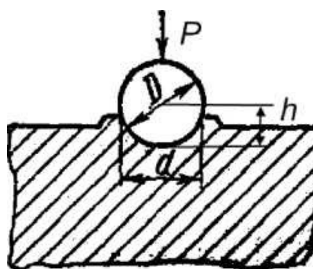


Рисунок 1.Схема измерения твердости по Бринеллю: D - диаметр шарика;
 d - диаметр отпечатка; h - глубина отпечатка

К технологическим свойствам относится способность стали подвергаться различным методам горячей и холодной обработки: литейные свойства, деформируемость, свариваемость и обрабатываемость режущим инструментом. Эти свойства позволяют производить формоизменяющую обработку и получать заготовки и детали машин [7].

Литейные свойства определяются способностью расплавленного металла или сплава к заполнению литейной формы, степенью химической неоднородности по сечению полученной отливки, а также величиной усадки - сокращением размеров при кристаллизации и дальнейшем охлаждении.

Деформируемость- это способность принимать необходимую форму под влиянием нагрузки без разрушения и при наименьшем сопротивлении нагрузке.

Свариваемость - это способность металлов и сплавов образовывать неразъемные соединения требуемого качества.

Обрабатываемость- свойство металла поддаваться обработке резанием.

Критериями обрабатываемости являются режимы резания и качество поверхностного слоя.

Технологические свойства часто определяют выбор материала для конструкции. Разрабатываемые материалы могут быть внедрены в производство только в том случае, если их технологические свойства удовлетворяют необходимым требованиям.

К эксплуатационным свойствам в зависимости от условия работы машины или конструкции относят:

- износостойкость - способность материала сопротивляться поверхностному разрушению под действием внешнего трения;
- коррозионную стойкость - сопротивление сплава действию агрессивных кислотных и щелочных сред;
- хладостойкость- способность сплава сохранять пластические свойства при температурах ниже 0 °С;
- жаропрочность- способность сплава сохранять механические свойства при высоких температурах;
- жаростойкость- способность сплава сопротивляться окислению в газовой среде при высоких температурах;
- антифрикционность- способность сплава прирабатываться к другому сплаву.

Эти свойства определяются в зависимости от условия работы машин или конструкций специальными испытаниями.

При выборке материала для создания технологической конструкции необходимо комплексно учитывать его прочностные, технологические и эксплуатационные характеристики [8].

1.2 Технологические свойства стали

Жидкотекучесть. Одним из основных технологических свойств стали является ее жидкотекучесть. Под жидкотекучестью понимают способность стали легко течь и заполнять мельчайшие полости формы. Жидкотекучесть влияет на образование концентрированной усадочной раковины в прибыли и на максимальное удаление из стали газов и неметаллических включений как в слитках, так и в отливках.

На жидкотекучесть оказывают влияние температура, химический состав стали, количество и форма неметаллических включений и содержание газов. В значительной степени жидкотекучесть зависит также от теплофизических свойств формы и стали.

Понятие о жидкотекучести может быть дано при анализе бинарного

сплава, который образует твердый раствор одного компонента в другом (растворителе). Нулевой жидкотекучестью обладает сплав в то время, когда он перестает течь, что объясняется образованием в нем твердой фазы.

Истинной называется жидкотекучесть, полученная при заливке проб при постоянной величине перегрева над температурой нулевой жидкотекучести для различных сплавов. Практическая жидкотекучесть получается при постоянной температуре заливки [9].

Известно, что вязкость металла с высокими температурами плавления дает возможность по ее изменению судить об изменениях в строении жидкого металла. В связи с этим были сделаны попытки связать жидкотекучесть с вязкостью металла и тем самым подойти к исследованиям изменений в строении жидкого металла через более легко определяемую, чем вязкость, жидкотекучесть металла.

Изучение механических свойств, изменения фазового состава, линейной усадки, газонасыщенности, неметаллических включений, а также макро- и микроструктуры стали, залитой при температурах, соответствующих скачкообразному изменению жидкотекучести, показало, что наилучшие пластические свойства стали наблюдались для случая заливки при температуре 1550° С. Заливка ли при температуре 1450° С коренным образом меняет микроструктур. Фазовый состав стали, залитый при этой же температуре, значительно отличается от остальных. Все это дает возможность считать возможным наличие связи между жидкотекучестью и строением расплавленного металла [10].

Склонность стали к пленообразованию. Способность стали при определенных температурах образовывать на открытых поверхностях окисные пленки называется склонностью ее к пленообразованию. Это свойство стали приводит к повышению брака отливок или слитков по срям и пленам.

Отсутствие на поверхности металла в ковше слоя шлака давало возможность отчетливо наблюдать характер образующей пленки, покрывающей всю поверхность зеркала металла, находящегося в ковше.

Было установлено, что характер образующейся пленки во многом зависит от состава стали. Например, хромистые стали затягиваются пленкой, состоящей из окислов хрома в виде елочек, кремнистые стали покрываются пленкой белого цвета — вся поверхность металла как бы зализывается молоком и т. д.

Способность стали к образованию плен связано со сродством основного компонента в ней к кислороду. Наибольшее воздействие на склонность стали к пленообразованию оказывают элементы в порядке убывания: алюминий, титан, хром и кремний. Сочетание хрома и титана чрезвычайно резко увеличивает пленообразование стали. Никель, кобальт и молибден не окисляются и понижают склонность стали к пленообразованию, чем и улучшают ее технологичность.

Разливка стали, склонной к пленообразованию, вызывает значительные технологические трудности, связанные с повышением температуры ее при заливке и применением при разливке инертной атмосферы [11].

Усадка. Процесс затвердевания стали сопровождается изменением ее объема. Уменьшение объема стали в процессе ее затвердевания называется усадкой.

В результате уменьшения объема стали при переходе ее из жидкого состояния в твердое в отливках получают пустоты — усадочные раковины и усадочные поры.

Усадочная раковина образуется в тех местах отливки, откуда жидкая сталь при уменьшении в объеме всей отливки, уходит вследствие силы тяжести. Усадочные поры образуются между дендритами при замыкании ими своих ветвей. Оба типа усадки нарушают сплошность отливки или слитка.

Усадка оказывает решающее влияние на образование горячих и холодных трещин, а также на размеры отливки.

В таблице 1 приводятся средние данные величины усадки для некоторых сталей.

Таблица 1 - Средние данные величины усадки для некоторых сталей

Стали	%
Отливки из высоколегированных хромистых сталей	1,3 - 1,7
Отливки из феррито-аустенитных сталей	1,8 - 2,2
Отливки из чисто аустенитных сталей	2,5 - 3,0
Отливки из углеродистых и низколегированных конструкционных сталей	1,6 - 2,0

Трещиностойкость. Одним из важнейших технологических свойств стали является «трещиностойкость», т. е. свойство стали к затвердеванию в виде отливки без образования на ее поверхности разрывов — трещин. До настоящего времени нет единого мнения о природе образования горячих трещин в отливках. Существует значительное количество факторов, определяющих трещиностойкость стали. К таким факторам относятся: температура, содержание серы и других химических компонентов, скорость заливки и т. д.

Обрабатываемость. Стальные отливки подвергаются всем видам механической обработки, и требования по обрабатываемости отливок определяют выбор состава стали и методы ее термической обработки.

Отожженная углеродистая сталь со средним содержанием, углерода 0,25-0,35% обладает наилучшей обрабатываемостью. Понижение содержания углерода (до 0,20%) приводит к образованию вязкой стружки и плохой поверхности. Наличие на поверхности литейной корки отливки неметаллических включений (шлак, земля) резко снижает стойкость резца, поэтому обдирку отливки или слитка или снятие литейной корки производят резцами из сверхтвердого сплава.

Повышение содержания в стали серы и селена улучшает ее обрабатываемость. Этот метод повышения обрабатываемости стали не может быть рекомендован для использования в промышленности, так как это приведет

к значительному загрязнению отходов серой и селеном, что усложнит металлургический их передел.

Свариваемость. В машиностроении все большее значение приобретают сварные изделия, состоящие из отдельных деталей. В связи с этим значительное место занимает в определении технологичности стали возможность ее сваривания без образования трещин.

Сварка связана с сильным перегревом металла и снижением пластичности, ударной его вязкости в околошовной зоне, что создает опасность хрупкого разрушения сварного изделия, особенно при динамических нагрузках. Способность стали свариваться без снижения механических свойств и без образования трещин и определяет ее технологичность по свариваемости.

На свариваемость стали оказывает решающее влияние ее химический состав и наличие вредных примесей (сера, фосфор, кислород и т.д.) [12].

1.3 Классификация сталей

На рисунке 2 приводится классификация сталей по химическому составу, качеству и назначению.

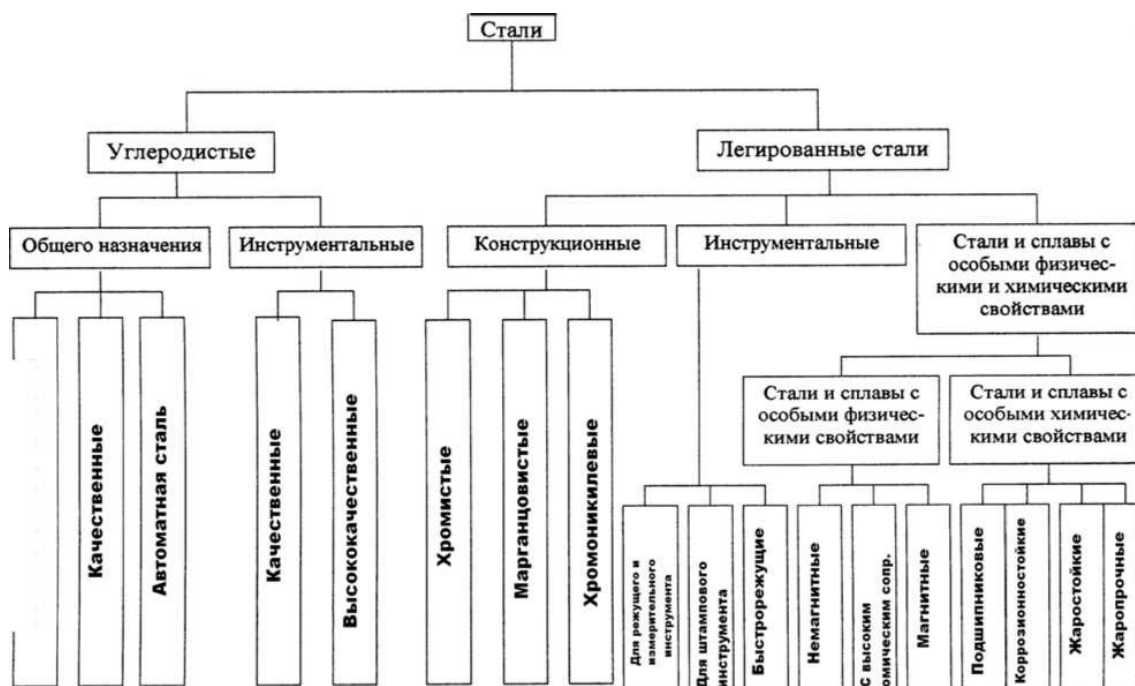


Рисунок 2. Классификация сталей

По химическому составу классифицируют главным образом конструкционные стали, предназначенные для изготовления деталей машин и металлических конструкций. Конструкционные стали делят на углеродистые и легированные.

Углеродистые стали могут быть:

- низкоуглеродистые: С от 0,09 до 0,25 %;

- среднеуглеродистые: С от 0,25 до 0,45 %
- высокоуглеродистые: С от 0,45 до 0,75 %.

Легированные стали условно подразделяют на:

- низколегированные с содержанием легирующих элементов 2,5-5 %;
- среднелегированные - до 10 %
- высоколегированные - более 10%.

Другие стали, например инструментальные, с особыми физико-химическими свойствами по химическому составу обычно не классифицируются [13].

По назначению стали подразделяют на конструкционные, инструментальные и стали и сплавы с особыми свойствами - жаропрочные, кислотостойкие, износостойкие, магнитные и др.

По качеству различают стали общего назначения, качественные, высококачественные и особовысококачественные, в последнем случае в маркировке указывается способ выплавки и последующей обработки стали.

Стали углеродистые общего назначения согласно ГОСТ 380-88 подразделяются на три группы:

- группа "А" - регламентированы механические свойства;
- группа "Б" - регламентирован химический состав;
- группа "В" - регламентированы оба показателя.

В соответствии с этим стали обозначают БСт1, ВСт2, БСт6, ВСт3 и т.д.; в сталях первой группы буквенный индекс, как правило, опускается: Ст3, Ст5 и т.д. Чем выше номер в обозначении, тем выше прочность стали и ниже её пластичность. Стали этой группы в зависимости от степени раскисления подразделяются на спокойные –(сп); полуспокойные – (пс); кипящие – (кп). Индекс “сп” обычно в обозначении опускается, а другие ставятся в конце марки: БСт3пс, ВСт2кп.

Качественные углеродистые стали согласно ГОСТ 1050-74 маркируются цифрами, указывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента: сталь 10, сталь 15, ..., сталь 80. Содержание серы и фосфора в этих сталях не должно превышать 0,035 %. Стали этой группы, содержащие свыше 0,2 % С, выпускаются только спокойными.

Легированные конструкционные стали (ГОСТ 4543-71) в зависимости от содержания серы и фосфора подразделяются на качественные (менее 0,035% каждого); высококачественные (менее 0,25% каждого); особовысококачественные, содержащие $S < 0,015 \%$ и $P < 0,025 \%$.

Все высоколегированные стали содержат минимальное количество вредных примесей и являются высококачественными. Для придания особых свойств их подвергают дополнительной обработке специальными методами, которые отражены в обозначении сталей в конце наименования марки [14].

2 Сущность процесса получения сталей

Сталь является основным видом металла, применяемым для создания современной техники. Это объясняется тем, что сталь обладает высокими прочностью и износостойкостью, хорошо сохраняет приданную форму в изделиях, сравнительно легко поддается различным видам обработки. Кроме того, основной компонент стали - железо является широко распространенным элементом в земной коре.

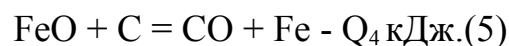
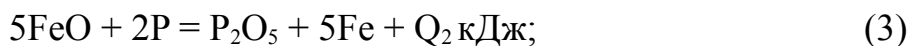
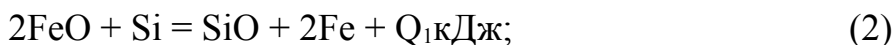
Основными материалами для производства стали являются переплавный чугун и стальной лом (скрап). Содержание углерода и примесей в стали значительно ниже, чем в чугуне.

Сущностью любого металлургического передела чугуна в сталь является снижение содержания углерода и примесей путем их избирательного окисления и перевода в шлак и газы. В процессе плавки стали происходит взаимодействие между металлической, шлаковой и газовой фазами и футеровкой плавильного агрегата, различными по агрегатному состоянию и химическому составу. В результате этого взаимодействия осуществляется переход химических элементов из одной фазы в другую. Обменные процессы сопровождаются химическими превращениями главным образом на границе металлической фазы со шлаком. Металлическая фаза состоит из расплава химических элементов, шлаковая - из расплава оксидов и их соединений. Поэтому переход элемента из одной фазы в другую возможен только при протекании химической реакции образования или восстановления оксида. Так как примеси по своим физико-химическим свойствам различны, то для их удаления в плавильном агрегате создают определенные условия, используя основные законы физической химии.

В соответствии с законом действующих масс скорость химических реакций пропорциональна концентрации реагирующих веществ. Поскольку в наибольшем количестве в чугуне содержится железо, то оно окисляется, в первую очередь, при взаимодействии чугуна с кислородом в сталеплавильной печи по реакции [15]:



Одновременно с железом окисляются Si, P, C, Mn и др. Образующийся оксид железа при высоких температурах отдает свой кислород более активным элементам - примесям в чугуне, окисляя их [16]:



Чем больше оксида железа содержится в жидком металле, тем активнее

окисляются примеси. Для ускорения окисления примесей в сталеплавильную ванну добавляют железную руду, окалину, содержащие много оксидов железа. Таким образом, основное количество примесей окисляется за счет кислорода оксида железа.

Скорость окисления примесей зависит не только от их концентрации, но и от температуры металла, и подчиняется принципу Ле Шателье. В соответствии с этим принципом химические реакции, выделяющие теплоту, протекают интенсивнее при более низких температурах или при некотором понижении температуры, а реакции, поглощающие теплоту, протекают активнее при высоких температурах или при некотором повышении температуры. Поэтому в начале плавки, когда температура металла невысока, интенсивнее идут процессы окисления кремния, фосфора, марганца, протекающие с выделением теплоты, а углерод интенсивно окисляется только при высокой температуре металла (в середине и конце плавки).

После расплавления шихты в сталеплавильной печи образуются две несмешивающиеся среды: жидкий металл и шлак. Шлак представляет собой сплав оксидов с незначительным содержанием сульфидов. Образование шлака связано с окислением элементов металлической фазы во время плавки и образованием различных оксидов с меньшей плотностью, чем металл, собирающихся на его поверхности. В соответствии с законом распределения (закон Нернста), если какое-либо вещество растворяется в двух соприкасающихся, но несмешивающихся жидкостях, то распределение вещества между этими жидкостями происходит до установления определенного соотношения (константы распределения), постоянного для данной температуры. Поэтому большинство компонентов (Mn, Si, P, S) и их соединения, растворимые в жидком металле и шлаке, будут распределяться между металлом и шлаком в определенном соотношении, характерном для данной температуры.

Нерастворимые соединения в зависимости от плотности будут переходить либо в шлак, либо в металл. Изменяя состав шлака, можно менять соотношение между количеством примесей в металле и шлаке так, что нежелательные примеси будут удаляться из металла в шлак. Убирая шлак с поверхности металла и наводя новый путем подачи флюса требуемого состава, можно удалять вредные примеси (серу, фосфор) из металла. Поэтому регулирование состава шлака с помощью флюсов является одним из основных путей управления металлургическими процессами [17].

Используя изложенные законы, процессы выплавки стали осуществляют в несколько этапов.

Первый этап - расплавление шихты и нагрев ванны жидкого металла. На этом этапе температура металла невысока; интенсивно происходят окисление железа, образование оксида железа и окисление примесей Si, P, Mn по реакциям (1)-(4). Наиболее важная задача этого процесса - удаление фосфора (одной из вредных примесей в стали). Для этого необходимо проведение плавки в основной печи, в которой можно использовать основной шлак, содержащий CaO.

Второй этап - «кипение» металлической ванны - начинается по мере ее

прогрева до более высоких, чем на первом этапе температур. При повышении температуры металла в соответствии с принципом Ле Шателье более интенсивно протекает реакция (5) окисления углерода, происходящая с поглощением теплоты. Поскольку в металле содержится больше углерода, чем других примесей, то в соответствии с законом действующих масс для окисления углерода в металл вводят незначительное количество руды, окалины или вдувают кислород.

Образующийся в металле оксид железа реагирует с углеродом по реакции (5), а пузырьки оксида углерода CO выделяются из жидкого металла, вызывая «кипение» ванны. При «кипении» уменьшается содержание углерода в металле до требуемого, выравнивается температура по объему ванны, частично удаляются неметаллические включения, прилипающие к всплывающим пузырькам CO, а также газы, проникающие в пузырьки CO. Все это способствует повышению качества металла. Поэтому этап «кипения» ванны является основным в процессе выплавки стали.

В этот же период создаются условия для удаления серы из металла. Сера в стали находится в виде сульфида $[FeS]$, который растворяется также в основном шлаке (FeS). Чем выше температура, тем большее количество FeS растворяется в шлаке, т.е. больше серы переходит из металла в шлак. Сульфид железа, растворенный в шлаке, взаимодействует с оксидом кальция, также растворенным в шлаке.

Третий этап (завершающий) - раскисление стали - заключается в восстановлении оксида железа, растворенного в жидком металле. При плавке повышение содержания кислорода в металле необходимо для окисления примесей, но в готовой стали кислород - вредная примесь, так как понижает механические свойства стали, особенно при высоких температурах [18].

Сталь раскисляют двумя способами: осаждающим и диффузионным. Осаждающее раскисление осуществляют введением в жидкую сталь растворимых раскислителей (ферромарганца, ферросилиция, алюминия), содержащих элементы Mn, Si, Al и др., которые в данных условиях обладают большим сродством к кислороду, чем железо. В результате раскисления восстанавливается железо и образуются оксиды MnO , SiO_2 , Al_2O_3 и другие, которые имеют меньшую плотность, чем сталь, и удаляются в шлак. Однако часть их может остаться в стали, что понижает ее свойства.

Диффузионное раскисление осуществляют раскислением шлака. Ферромарганец, ферросилиций и другие раскислители в мелко размельченном виде загружают на поверхность шлака. Раскислители, восстанавливая оксид железа, уменьшают его содержание в шлаке. В соответствии с законом распределения оксид железа, растворенный в стали, начнет переходить в шлак. Образующиеся при таком способе раскисления оксиды остаются в шлаке, а восстановленное железо переходит в сталь, что уменьшает содержание в ней неметаллических включений и повышает ее качество. В зависимости от степени раскисленности выплавляют спокойные, кипящие и полуспокойные стали.

Спокойная сталь получается при полном раскислении в печи и ковше.

Кипящая сталь раскисляется в печи не полностью. Ее раскисление продолжается в изложнице при затвердевании слитка благодаря взаимодействию FeO и углерода, содержащихся в металле. Образующийся при реакции оксид углерода выделяется из стали, способствуя удалению из стали азота и водорода. Газы выделяются в виде пузырьков, вызывая ее «кипение». Кипящая сталь не содержит неметаллических включений продуктов раскисления, поэтому обладает хорошей пластичностью.

Полуспокойная сталь имеет промежуточную раскисленность между спокойной и кипящей. Частично она раскисляется в печи и в ковше, а частично - в изложнице благодаря взаимодействию оксида железа и углерода, содержащихся в стали [19].

Легирование стали осуществляют введением ферросплавов или чистых металлов в необходимом количестве в расплав. Легирующие элементы (Ni, Co, Mo, Cu), сродство к кислороду у которых меньше, чем у железа, при плавке и разливке практически не окисляются, и поэтому их вводят в печь в любое время плавки (обычно вместе с остальной шихтой). Легирующие элементы, у которых сродство к кислороду больше, чем у железа (Si, Mn, Al, Cr, V, Ti и др.), вводят в металл после раскисления или одновременно с ним в конце плавки, а иногда непосредственно в ковш [20].

3 Ферросплавы

Ферросплавы представляют собой сплавы железа с другими элементами: кремнием, марганцем, хромом, вольфрамом и др. Двойные сплавы называются: ферросилиций, ферромарганец, феррохром, ферровольфрам. Тройные сплавы, например, сплав железа, кремния и марганца, железа, кремния и хрома называются, соответственно, ферросиликомарганец (или силикомарганец), ферросиликохром (или силикохром) и т.п. Сокращенно сплавы можно обозначать таким образом: ферросилиций - FeSi, феррохром - FeCr, ферросиликомарганец - FeSiMn (или SiMn) и т.п.

К ферросплавам относятся также и низгожелезистые сплавы, например, кристаллический кремний, в котором содержание железа не выше 1,5 %, металлический марганец (содержание железа не выше 3 %), металлический хром, силикокальций, силикоалюминий и др.

Основные компоненты ферросплавов: кремний, хром, марганец называются ведущими элементами, так как содержание их в сплаве с железом определяет качество и назначение сплава, трудоемкость получения, расход электроэнергии, расход сырых материалов на 1 т сплава и т.д. [21].

Современная электрометаллургия ферросплавов специализируется на первичном извлечении металлов из руд, концентратов и технически чистых оксидов. К ферросплавам относятся и так называемые лигатуры и модификаторы, отличающиеся от последних своим назначением. Лигатуру получают либо сплавлением составляющих ее компонентов, либо восстановлением их из руд и концентратов. Лигатура имеет более низкую температуру плавления, чем любой из входящих в ее состав металлов, быстрее растворяется при легировании ею сплавов и при этом уменьшается угар элементов. Модификатор— вещество, малые количества которого существенно изменяют структуру и свойства обработанного им металла или сплава. Этот эффект называют модифицированием. Согласно классификации академика П. А. Ребиндера (1898 - 1972 гг.) модификаторы делятся на две группы: модификаторы первого рода — поверхностно-активные вещества (ПАВ); модификаторы второго рода — инокуляторы.

Модификаторы первого рода адсорбируются на зародышах кристаллизующихся металлических расплавов, тормозят их рост и тем самым измельчают структуру. Модификаторы второго рода облегчают образование в расплаве центров кристаллизации и также измельчают микроструктуру конструкционных сталей и сплавов [22].

Согласно современной классификации металлы делятся на две основные группы: черные и цветные. К первой группе относится железо во всем многообразии продуктов, где оно является основным металлов — чугун, стали различного химического состава и ферросплавы. Вторая группа объединяет практически все известные металлы. В зависимости от физико-химических свойств металлы подразделяются на следующие группы:

- 1) легкие (Al, Ba, Be, K, Ca, Li, Mg, Na, Rb, Si, Sr, Ti, Cs);
- 2) редкие (V, W, Ga, Hf, Y, Ge, Mo, Re, P3M, Se, Ta, Tl, Te, Zr);
- 3) тяжелые (As, Bi, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Hg, Ni, Sb, Sn, Pb);

- 4) благородные (Au, Ag, Ir, Os, Rt, Rd, Rh, Ru);
- 5) радиоактивные (Pu, Po, Ra, Np, Th, U).

Согласно зонной теории строения твердых тел, основой которой является анализ поведения электронов периодической кристаллической решетке, выделяют четыре группы кристаллических веществ: металлы, полупроводники, полуметаллы, диэлектрики. Металл определяется как твердое тело, основные физические свойства которого обусловлены наличием свободных электронов (электронов проводимости) с концентрацией порядка одного электрона на атом. Полуметалл имеет 10^{-3} — 10^{-5} свободных электронов на атом и его свойства определяются в основном перекрытием энергетических зон (рисунок 3, а). В полупроводниках (Si, Ge, некоторые оксиды) при абсолютном нуле температуры нет свободных электронов и их электрическая проводимость мала. При повышении температуры вследствие малой ширины запрещенной зоны ΔE (рисунок 3, в, г) и появления электронов в зоне проводимости (для полупроводников акцепторного типа) или дырок в валентной зоне (полупроводники донорного типа) электрическая проводимость полупроводников существенно (в 10^2 — 10^3 раз) растет. Диэлектрики (оксиды Al_2O_3 , ZrO_2 и др.) характеризуются низкой электрической проводимостью (в 10^4 — 10^6 раз меньшей, чем металлы), концентрация свободных электронов пренебрежимо мала при всех температурах, что обусловлено большой шириной запрещенной зоны ΔE (рисунок 3, б).

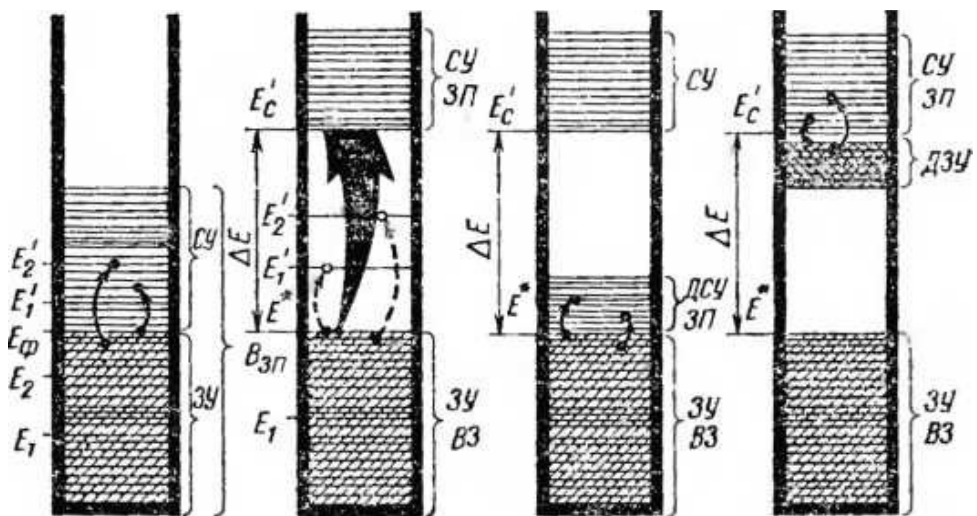


Рисунок 3. Электронная структура металлов (а), диэлектриков (б) и полупроводниковых материалов акцепторного (в) и донорного (г) типов:

СУ — свободные уровни; ЗУ — заполненные уровни; ВЗП — валентная зона проводимости; ЗП — зона проводимости; ВЗ — валентная зона; ДСУ — дополнительные свободные уровни; ДЗУ — дополнительные заполненные уровни.

Приведенная на рисунке 3 электронная структура металлов (а), диэлектриков (б) и полупроводниковых материалов акцепторного (в) и

донорного (γ) типов показывает распределение электронов по уровням энергии основного (E_1 , E_2) и возбужденного (E'_1 , E'_2) состояний.

Таким образом, макроскопические свойства твердого тела полностью определяются характером зонного строения и положением энергетических зон относительно уровня Ферми в металлах, и дна зоны проводимости E_c в диэлектриках и полупроводниках относительно высокоэнергетического заполненного уровня E [23].

Ферросплавы подразделяют на большие и малые; к первым относят сплавы, занимающие в общем объеме производства основное положение, ко вторым — менее распространенные.

I. Группа больших ферросплавов (или массового применения):

1) сплавы кремния (ферросилиций всех марок, кристаллический кремний);

2) марганцевые ферросплавы (высоко-, средне- и низкоуглеродистый ферромарганец, товарный и переделный силикомарганец, металлический силикотермический и электролитический марганец, азотированный марганец);

3) хромистые ферросплавы (высоко-, средне- и низкоуглеродистый феррохром, товарный и переделный ферросиликохром, металлический хром, азотированный феррохром).

II. Группа малых ферросплавов:

1) ферровольфрам и сплавы с вольфрамом ($W-Cr$, $W-Ni$);

2) ферромолибден и лигатуры с молибденом ($Mo-Al-Ti$, $Mo-Al-Ni$, $Mo-Al-Cr-Fe$);

3) феррованадий и сплавы с ванадием ($Fe-Si-V$, $Fe-Mn-V$, $V-Ca-Si$);

4) сплавы щелочноземельных металлов ЦЗМ (силикокальций, силикобарий, силико-магний, силикостронций, комплексные сплавы систем $Fe-Si-Mg-Ca$, $Si-Ca-Ba-Fe$, $Si-Ba-Fe$, $Si-Ba-Sr$ и др.);

5) феррониобий и сплавы систем $Ni-Nb$, $Nb-Ta-Fe$, $Nb-Ta-Mn-Al-Si-Ti$, $Nb-Ta-Al$;

6) ферротитанисплавы систем $Fe-Si-Ti$, $Ti-Cr-Al$, $Ti-Cr-Al-Fe$, $Ti-Ni$;

7) ферробор, ферроборал и лигатуры с бором ($Ni-B$, $Cr-B$, грейнал $B-Si-Al-Ti-Zr$);

8) сплавы с алюминием (силикоалюминий, ферроалюминий, ферросиликоалюминий, сплавы систем $Fe-Al-Mn-Si$, $Fe-Mn-Al$);

9) сплавы с редкоземельными металлами (РЗМ) систем $РЗМ-Si$, $Ce-Si-Fe$, $РЗМ-Al-Si$, $РЗМ-Ni-Si$;

10) ферросиликоцирконий, ферроалюминоцирконий;

11) ферроникель, феррокобальт.

Основные компоненты ферросплавов называют ведущими элементами. Степень восстановления и перехода в металл или извлечение ведущего элемента определяет технико-экономическую эффективность и целесообразность применяемой технологии. Анализ и сравнение показателей

производства ферросплавов из сырья различного состава и происхождения в печах разной конструкции и мощности приводятся при условии пересчета количества ферросплавов в базовые тонны. Базовая тонна — это 1 т ферросплава, руды, концентрата со строго определенным содержанием ведущего элемента или его соединения. Например, в соответствии со стандартом ферросилиций марки ФС45 может содержать 41—47% Si, а за базовую тонну принята 1 т сплава с 45% Si [24].

Свойства ферросплавов во многом зависят от физико-химических свойств ведущих элементов, которые представляют собой металлы первых трех больших периодов, точнее, переходные металлы первого (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni), второго (Y, Zr, Nb, Mo), третьего (La, Ta, W) периодов, а также металлы, находящиеся в начале больших периодов (Ca, Sr и Ba) Периодической системы элементов Д. И. Менделеева. Свойства металлов в значительной мере определяются строением их внешних электронных оболочек. В соответствии с изменением электронной конфигурации металлов закономерно изменяются их свойства. Например, температура плавления металлов, как характеристика сопротивления кристаллической решетки тепловым колебаниям, в каждом большом периоде по мере заполнения d-уровня электронами повышается, достигая максимальных значений для хрома (первый период), молибдена (второй период) и вольфрама (третий период), а затем снижается (рисунок 4). Такой же характер наблюдается для температуры кипения металлов, как мера энергии межатомной связи (рисунок 5), теплоты испарения, валентности и некоторых других свойств элементов.

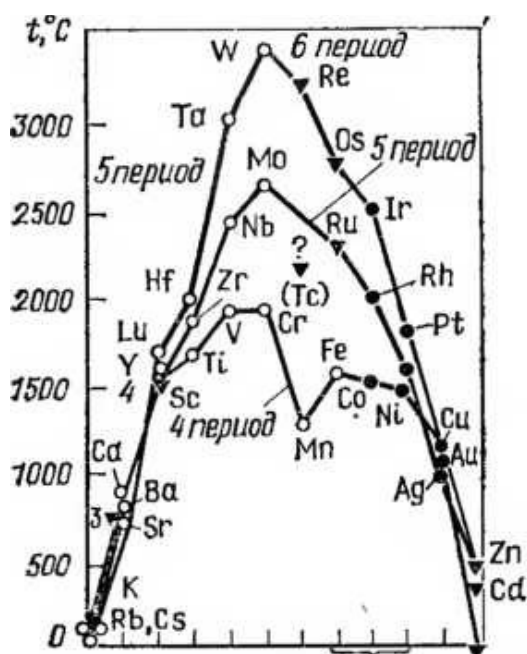


Рисунок 4. Температура плавления элементов

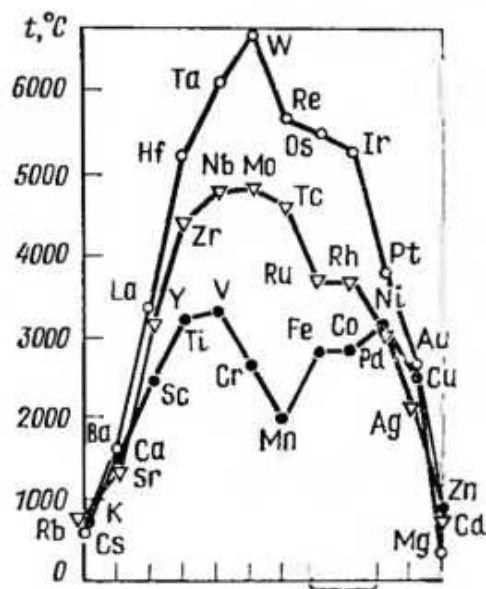


Рисунок 5. Температура кипения элементов

Аномалия для марганца, хрома и железа (по В. К. Григоровичу) обусловлена их небольшими атомными массами и менее ярко выраженными металлическими свойствами по сравнению с молибденом, вольфрамом и др. С

этим связано резкое снижение прочности металлической связи у марганца. Таким образом, получение и применение ферросплавов основывается на физико-химических свойствах, придаваемых ведущими элементами и зависящих от их положения в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева, которое определяется зарядом ядра [25].

Основное количество ферросплавов используют в сталеплавильном производстве для легирования и раскисления стали, а также для легирования и модифицирования чугуна и сплавов, для производства химических соединений, в качестве исходного материала для защитных покрытий на металлических конструкциях и устройствах, при обогащении полезных ископаемых. Ферросплавы служат исходным сырьем при получении особо чистых веществ (элементов и соединений) и широко используются в качестве восстановителей в металлотермических процессах.

Большинство ферросплавов содержит значительное количество железа. Это обусловлено тем, что в исходном сырье вместе с ведущим элементом всегда присутствуют оксиды железа, которые не являются вредной примесью для большинства ферросплавов. Более того, железо, растворяя восстановленный ведущий элемент, снижает активность последнего и температуру плавления ферросплавов, повышает плотность ряда ферросплавов и увеличивает полезное использование ведущих элементов при раскислении и легировании стали и сплавов. Железо играет положительную роль в восстановительных процессах при получении ферросплавов. Образование металлических растворов восстанавливаемых элементов в железе снижает активность ведущего элемента в растворе, что уменьшает изменение энергии Гиббса процесса восстановления. Так, при образовании растворов на основе железа восстановление ведущего элемента возможно при более низких температурах с лучшим результатом извлечения, поэтому часто железо специально вводят в шихтовые материалы (в виде стружки, оксидов). Стоимость восстановленных элементов в ферросплавах ниже, чем в чистом виде [26].

3.1 Общие требования к качеству ферросплавов

Качество ферросплавов характеризуется содержанием и пределами колебаний ведущего элемента, концентрацией регламентируемых сопутствующих примесей (C, S, P, цветные металлы, N и др.), гранулометрическим составом, плотностью, состоянием поверхности кусков, слитка, температурой плавления, содержанием неметаллических включений, кислорода, водорода и др. Основным показателем качества ферросплавов является его химический состав и, прежде всего, содержание в нем ведущего элемента. В соответствии с требованиями изготовителей стали, заинтересованных в малой массе легирующей присадки, ферросплавная промышленность выпускает преимущественно сплавы с высокой концентрацией ведущего элемента. При этом важно постоянство содержания легирующего элемента в ферросплаве отдельных плавов, объединяемых в одну партию.

Однородность химического состава ферросплавов характеризуется максимально допустимым отклонением от среднего содержания ведущего элемента в партии. Для большинства ферросплавов это отклонение устанавливается равным $\pm 2\%$, что обеспечивает получение стали с узкими заданными пределами содержания легирующих элементов.

Присадка ферросплавов в стальную ванну осуществляется, как правило, в заключительный период плавки, когда возможности рафинирования металла от примесей, внесенных ферросплавами, ограничены. В связи с этим стандарты на ферросплавы нормируют содержание примесей, вредное влияние которых на свойства стали установлено.

В первую очередь это относится к фосфору, сере и углероду. В настоящее время в стандарты на ферросплавы введены нормы содержания таких остаточных элементов, как титан, алюминий, ванадий, вольфрам, молибден и другие, контроль которых ранее не предусматривался.

Особо вредными в ферросплавах являются примеси цветных металлов (Си, Pb, Zn, Sn, Sb, As, Bi, Cd), которые практически не удаляются из металла в процессе плавки. В связи с этим содержание цветных металлов в металлической шихте, в первую очередь, в ферросплавах ограничивают. Особую актуальность этот вопрос приобрел в последнее время, поскольку в условиях вынужденного использования бедных и комплексных руд не всегда можно гарантировать постоянство химического состава [27].

Важной характеристикой качества ферросплавов является его гранулометрический состав, поскольку при правильном его выборе ускоряется процесс расплавления, обеспечивается высокое усвоение легирующего элемента и уменьшаются потери ферросплавов при транспортировке. Допустимый размер кусков в стандартах характеризуется габаритными размерами (< 300 мм) или максимальной массой куска (5 - 45 кг). Для снижения потерь сплава специально оговаривается допустимое количество мелочи определенного класса крупности (3 - 10% фракции < 20 мм). По требованию потребителей осуществляется поставка ферросплавов со строго заданным гранулометрическим составом. Внешний вид кусков сплава также дает представление о его качестве. Высококачественные ферросплавы не должны иметь окисленной поверхности, приварок шлака и обмазки изложниц, представляющих дополнительный источник газов и включений в стали. Практика сталеплавильных заводов свидетельствует о необходимости учета при оценке качества ферросплавов не только их химического состава, но и физических свойств (температуры плавления, плотности и др.), которые в значительной мере определяют эффективность процесса легирования стальной ванны. Недопустимо большое различие плотностей ферросплава и легируемого металла. Стандарты на ферросплавы пока не оговаривают уровень их физических свойств, хотя такие данные существенно облегчают выбор типа легирующей добавки при выплавке стали и сплавов различных марок. Важное значение имеют также механические свойства легирующих добавок,

поскольку на их основе производится выбор дробильных устройств для получения заданного гранулометрического состава сплавов.

Выплавка ферросплавов сопровождается их загрязнением неметаллическими включениями. Это связано с повышенной концентрацией в ферросплавах элементов, обладающих значительным химическим сродством к кислороду. Поскольку непосредственная оценка количества включений в ферросплавах путем их подсчета или выделения с последующим анализом по массе в настоящее время встречает затруднения, целесообразно контролировать их по содержанию в сплаве кислорода, азота, серы и углерода. Растворимость этих элементов в ферросплавах определяет количество и форму содержащихся в них включений. Важным фактором, влияющим на качество стали и сплавов, является содержание в ферросплавах газов, в особенности водорода и азота. Наиболее опасен водород в ферросплавах на основе высокореакционных металлов (Ti, V, Nb, Ca, Si), концентрация водорода в которых достигает 200 см³ на 100 г. Присадка таких ферросплавов в ковш приводит к рослости слитков. Более низкий уровень содержания водорода в ферросплавах особенно желателен при использовании дегазации стали под вакуумом. Прокаливание ферросплавов малоэффективно, так как позволяет удалить только влагу и не снижает, а иногда даже повышает, концентрацию кислорода и азота. Феррохром, например, вносит до 50% азота, содержащегося в коррозионностойкой стали. Хотя контроль газонасыщенности ферросплавов не предусмотрен действующими стандартами, ограничения по содержанию газов оправданы.

Очевидно, что требования к качеству ферросплавов должны устанавливаться в зависимости от их технологического назначения.

Чтобы правильно оценить и сравнить технико-экономические показатели при получении ферросплава, который может иметь разное содержание ведущего элемента, устанавливается условная базовая тонна. Например, при выплавке ферросилиция с содержанием 45% кремния по ГОСТ допускается колебание в содержании кремния от 41 до 47%. Базовой тонной для этого сплава принимается тонна с содержанием 45% кремния. Пересчет с натуральных тонн на базовые производится по формуле:

$$Q_{\text{баз.т.}} = \frac{Q_{\text{натур. т.}} \cdot A}{45} \quad (5)$$

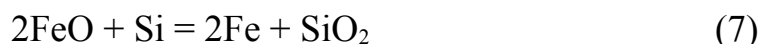
A- фактическое содержание кремния в данном сплаве, %.

Точно так же можно пересчитать и все остальные показатели на базовую тонну: расход сырых материалов, расход электроэнергии и т.п. [28].

Основная роль ферросплавов заключается в улучшении качества стали путем её раскисления и легирования. Ферросплавы, применяются также и для силикотермического восстановления окислов при получении, например, металлического марганца, безуглеродистого феррохрома и других.

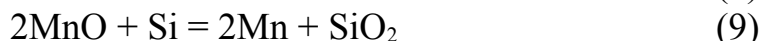
Раскисление стали состоит в связывании и удалении из нее лишнего кислорода, который остался в металле после плавки в таком количестве, что он может при прокатке или ковке вызвать красноломкость стали и привести к браку изделия.

Для раскисления применяют такие ферросплавы, в которых ведущий элемент обладает большим сродством к кислороду, чем железо, например, ферромарганец, ферросилиций, ферротитан, ферроцирконий и др. При введении в сталь таких ферросплавов в жидкой стальной ванне идут реакции раскисления:



Легирование стали различными элементами (Si, Cr, Mn, W), входящими в состав ферросплавов, имеет целью придания стали специальных физических и химических свойств. В результате легирования путем введения ферросплавов в жидкую стальную ванну получают нержавеющие марки стали (на основе феррохрома), быстрорежущую сталь (на основе фольфрама) и т.п.

Для целей силикотермического восстановления окислов выплавляют такие сплавы как силикохром, силикомарганец, которые вводят в ферросплавную печь наряду с соответствующими рудами, при этом идут реакции восстановления хрома или марганца за счет кремния по реакции:



Около 95% всех получаемых ферросплавов используются в металлургии стали. Следует отметить, что без наличия в сталеплавильном цехе раскислителей невозможно получение даже самых простых марок сталей, не говоря уже о специальных, легированных. В небольших количествах ферросплавы применяются также в цветной металлургии и химической промышленности.

Применение для раскисления и легирования ферросплавов, а не технически чистых элементов, объясняется тем, что чистые элементы значительно труднее выплавлять, чем ферросплавы, чистые элементы значительно дороже и, наконец, чистые элементы труднее растворяются в жидкой стали, чем ферросплавы.

Учитывая эти обстоятельства, технически чистые элементы применяются взамен соответствующих ферросплавов только в тех случаях, когда нельзя в ванну вводить железо или когда необходимо ввезти в ванну легирующий элемент с минимальным количеством других сопутствующих примесей (углерод, кремний).

Удельный расход ферросплавов на 1 т стали невелик: например, расход марганца в пересчете на металлический марганец составляет 9 кг/т (0,9 % от всей стали); ферросилиция пересчете на ФС45 - 7 кг/т (0,7 % от всей стали) [29].

3.2 Виды ферросплавных процессов

Для производства ферросплавов характерно многообразие применяемых технологических приемов. Это вызвано различием физико-химических свойств элементов, входящих в состав сплавов или получаемых в технически чистом виде.

На рисунке 6 и 7 приведена классификация промышленных способов получения ферросплавов [30].

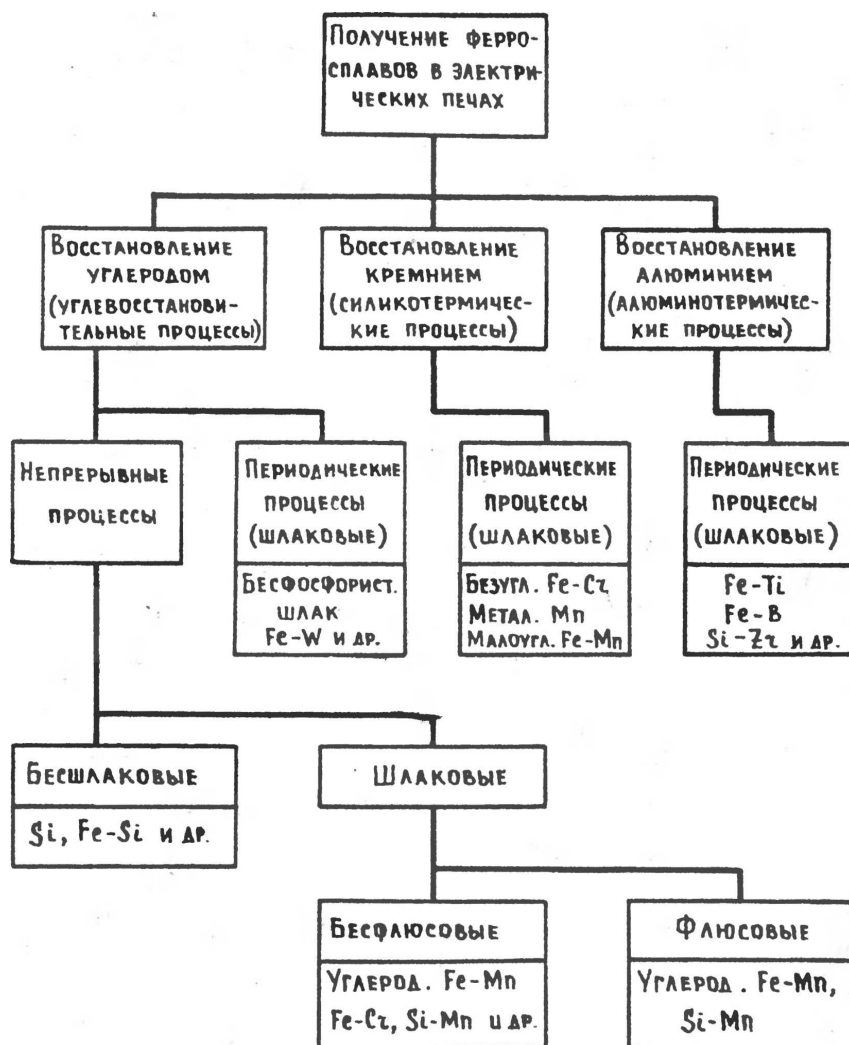


Рисунок 6. Классификация промышленных способов получения ферросплавов.

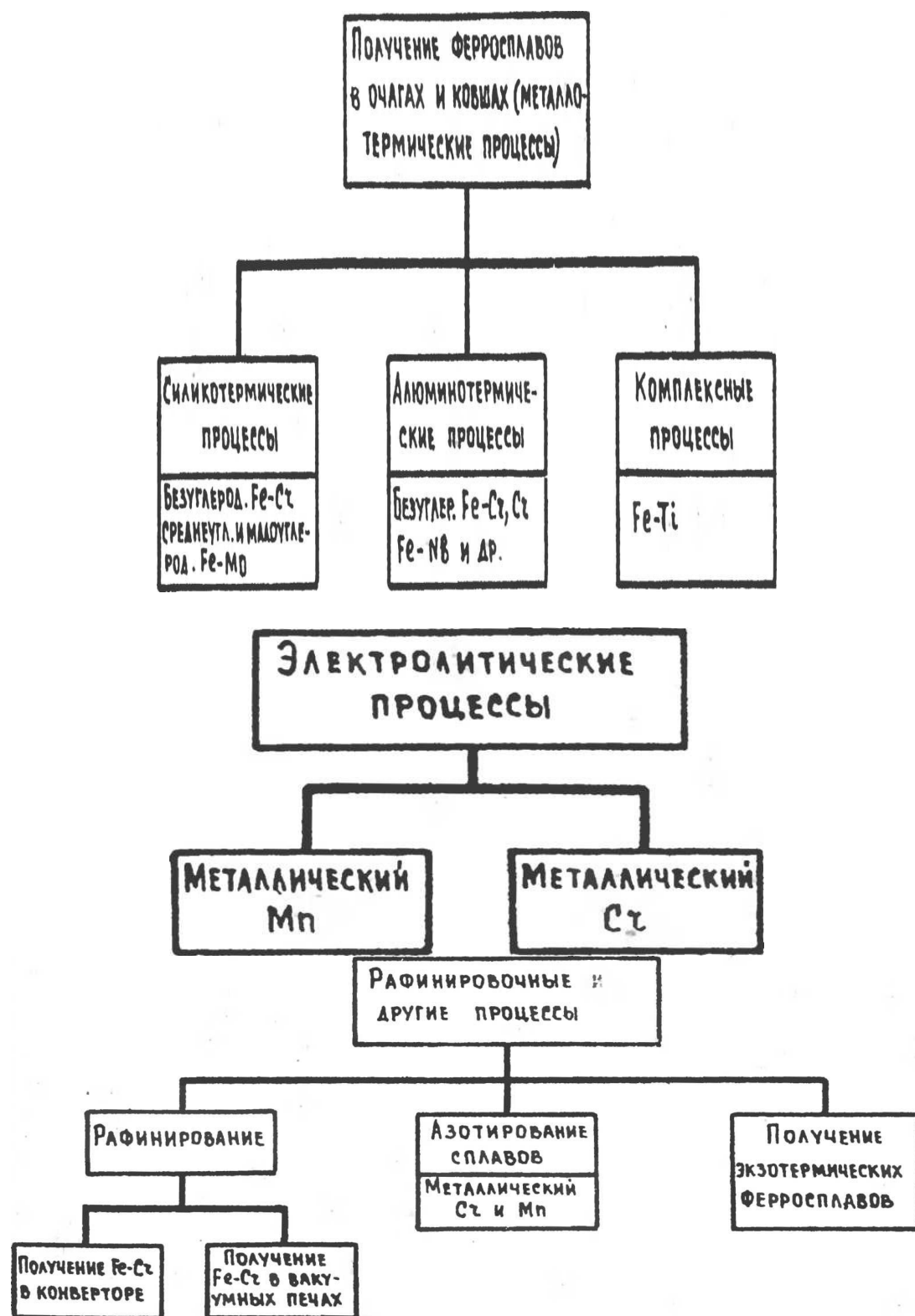


Рисунок 7. Классификация промышленных способов получения ферросплавов

Наиболее важными факторами, определяющими выбор способа и технологии, являются химический состав ферросплава и технико-экономические показатели производства.

Классификация способов получения ферросплавов по виду используемого агрегата.

Историческое развитие производства ферросплавов и технически чистых металлов определило основные способы извлечения элементов из руд и концентратов, существующие и в настоящее время: электротермический; металлотермический, доменный; электролитический.

Электротермические способы осуществляются в энергетических установках, позволяющих преобразовывать электрическую энергию в тепловую, используемую для восстановления, плавления, нагрева металлов и сплавов, а также рафинирования их. Все электротермические процессы делят на группы, отличающиеся типом и областью применения продуктов:

- 1) электрометаллургия ферросплавов;
- 2) электрометаллургия стали;
- 3) получение карбидов (кремния, бора, кальция и др.) и цианистых соединений [цианамида кальция CaCN_2 , цианида кальция $\text{Ca}(\text{CN})_2$ и натрия NaCN];
- 4) электроплавка оксидов (получение нормального, белого электрокорунда и монокорунда, кварцевого стекла, плавленого магнезита, муллита и т. д.);
- 5) возгонка и последующая конденсация элементов и соединений (фосфора, сероуглерода CS_2 и др.);
- 6) синтез и крекинг веществ в газовой фазе при помощи электрического разряда (озона, оксидов азота NO_x , пероксида водорода и др.).

Электротермические методы основаны на использовании дуговых электрических печей, в которых тепло выделяется при прохождении тока через газовый промежуток и шихтовые материалы, обладающие высоким электрическим сопротивлением. Сами процессы характеризуются возможностью получения высоких температур в области горения электрических дуг, химической нейтральностью источников тепла, возможностью осуществления процессов с любым составом газовой фазы (восстановительной, окислительной, нейтральной) и в вакууме, а также легко и быстро изменять мощность установки с полной автоматизацией ее работы.

Металлотермический способ основан на использовании тепла химических реакций восстановления оксидов алюминием, кремнием, кальцием. Эти процессы с применением алюминия могут проводиться без подвода электрической энергии, хотя в последние годы большая часть таких технологий предусматривает предварительное расплавление шихтовых материалов (оксидов) в дуговых электрических печах с целью интенсификации процесса, экономии дорогих восстановителей и более полного извлечения ведущих элементов из шихты в металл. Металлотермические методы производства ферросплавов, сплавов и технически чистых металлов подразделяются в зависимости от типа применяемого восстановителя (алюминотермия, силикотермия, кальциотермия); в ряде случаев используются одновременно несколько восстановителей. Ферросплавы, сплавы и металлы, выплавленные

металлотермическим методом, характеризуются низким содержанием углерода и ряда других примесей; при этом легко получить сплавы с низким содержанием железа на основе хрома, титана, никеля и других металлов. Процессы выплавки характеризуются высоким извлечением ведущих элементов, небольшими капитальными затратами на строительство цехов и необходимых установок. Металлотермическим методом получают несколько десятков различных ферросплавов и сплавов. При этом используют различные варианты аппаратного оформления процесса: внепечная плавка на блок, плавка с выпуском шлака и металла, электропечной процесс с предварительным расплавлением восстанавливаемых оксидов и флюсов, металлотермический переплав и т. д. Метод в настоящее время позволяет полнее использовать отвальные шлаки в огнеупорной, сталеплавильной, строительной отраслях промышленности.

Электролитические способы основаны на электролизе водных растворов или расплавленных солей и используются для получения особо чистых металлов. Однако это связано с расходом значительного количества электроэнергии и необходимостью применения особо чистых материалов.

Доменный процесс позволил впервые получать необходимые ферросплавы (с марганцем, кремнием и хромом), но он требует значительного расхода высококачественного кокса, а получаемые сплавы содержат много углерода. Недостатком доменной плавки является также невозможность достижения высоких температур вследствие образования большого количества газов и потерь с ними тепла [31].

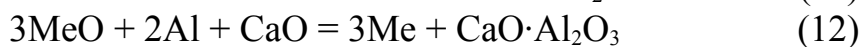
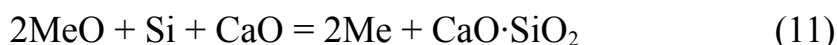
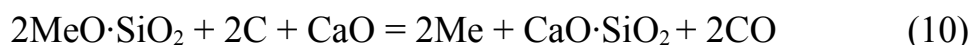
Необходимость использования относительно бедных руд и увеличение потребности в ферромарганце привели к производству высокоуглеродистого ферромарганца в мощных рудовосстановительных печах типа РПЗ-63. Расход кокса на 1 т сплава при выплавке его в электропечи составляет 450—500 кг (1700—1800 кг в доменных печах), что определяет более низкую его стоимость. Учитывая возможность применения при плавке ферромарганца и других сплавов дешевых и недефицитных видов углеродистого восстановителя (полукокса, газового угля и др.), а также значительное улучшение технико-экономических показателей процесса благодаря использованию предварительно восстановленных и нагретых шихтовых материалов, в дальнейшем получение высокоуглеродистого ферромарганца намечается проводить электротермическим методом. В последние годы получили развитие специальные методы производства ферросплавов в вакуумных печах сопротивления, индукционных печах и в конвертерах, позволяющие получать сплавы с особо низким содержанием углерода (0,03—0,01 % и менее), кислорода, водорода и неметаллических включений, а также азотированные ферросплавы с хромом, марганцем, ванадием и т. [32].

В последние годы в промышленность внедряются новые виды процессов получения ферросплавов путем рафинирования жидкого металла в конверторах при продувке кислородом (под вакуумом и без него), а также получение особо высококачественного металла путем рафинирования его в нагревательных печах

под вакуумом. Ведутся большие работы по изучению возможности применения в ферросплавной промышленности плавки в плазменных печах.

Флюсовые и бесфлюсовые процессы. В зависимости от того, дается при плавке флюс (известь, доломит, кварцит и т.п.) или нет, процессы выплавки ферросплавов делятся на флюсовые и бесфлюсовые. Естественно, что вторые проще и дешевле.

Выплавку ферросплавов при периодическом процессе чаще всего ведут флюсовым методом, хотя в определенных условиях целесообразна бесфлюсовая плавка. При флюсовом методе восстановление оксидов ведущего элемента происходит по реакциям [33]:

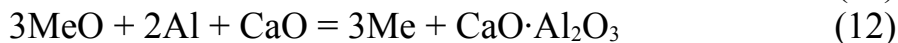
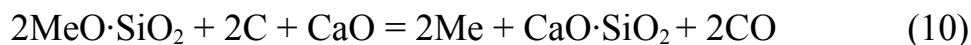


В дальнейшем получение высокоуглеродистого ферромарганца намечается проводить электротермическим методом. В последние годы получили развитие специальные методы производства ферросплавов в вакуумных печах сопротивления, индукционных печах и в конвертерах, позволяющие получать сплавы с особо низким содержанием углерода (0,03—0,01 % и менее), кислорода, водорода и неметаллических включений, а также азотированные ферросплавы с хромом, марганцем, ванадием и т. д.

В последние годы в промышленность внедряются новые виды процессов получения ферросплавов путем рафинирования жидкого металла в конверторах при продувке кислородом (под вакуумом и без него), а также получение особо высококачественного металла путем рафинирования его в нагревательных печах под вакуумом. Ведутся большие работы по изучению возможности применения в ферросплавной промышленности плавки в плазменных печах.

Флюсовые и бесфлюсовые процессы. В зависимости от того, дается при плавке флюс (известь, доломит, кварцит и т.п.) или нет, процессы выплавки ферросплавов делятся на флюсовые и бесфлюсовые. Естественно, что вторые проще и дешевле.

Выплавку ферросплавов при периодическом процессе чаще всего ведут флюсовым методом, хотя в определенных условиях целесообразна бесфлюсовая плавка. При флюсовом методе восстановление оксидов ведущего элемента происходит по реакциям [34]:



Способ может быть осуществлен при условии использования высококачественных руд и концентратов.

Выбор варианта технологии плавки с введением флюса в шихту или плавки без флюса определяется его экономичностью, возможностью повышения производительности каждой печи. Этот признак является основным, так как от типа восстановителя зависят не только физико-химические процессы, определяющие сущность технологии того или иного ферросплава, но и практические приемы ведения процесса, тип применяемого печного агрегата, химический состав получаемого сплава и область его использования. По этому признаку процессы производства ферросплавов классифицируются на углеродотермические (УТП), силикотермические (СТП) и алюминотермические (АТП).

Ведущим способом получения ферросплавов является электро-термический способ и поэтому основное количество различных видов ферросплавов производится в электропечах.

Электротермические и металлотермические способы могут быть классифицированы по роду применяемого восстановителя окислов:

1. Углевосстановительные процессы, при которых восстановителем служит углерод (коксик, антрацит и т.п.). Это самый дешевый восстановитель.

2. Силикотермические процессы, при которых восстановителем служит кремний сплавов силикомарганца, силикохрома, ферросилиция. Это значительно более дорогой восстановитель, чем коксик, но он дает возможность выплавлять безуглеродистые марки ферросплавов.

3. Алюминотермические процессы, при которых восстановителем служит алюминий. Это самый дорогой восстановитель, но он позволяет восстанавливать самые трудновосстановимые окислы и обеспечивает получение безуглеродистых сплавов.

Шлаковые и бесшлаковые процессы. Электротермические процессы подразделяют на бесшлаковые и шлаковые. Относительное количество шлака при производстве ферросплавов определяют или в процентах по отношению к массе металла, или по кратности шлака, т. е. по соотношению массы шлака и металла. Обычно к бесшлаковым процессам относят выплавку ферросплавов, при которых количество шлака незначительно и составляет 3—10% от массы металла (например, выплавка кристаллического кремния, ферросилиция, силикокальция, силикоалюминия, ферросиликохрома). При бесшлаковых процессах шлак образуется оксидами, содержащимися в небольших количествах в рудах, концентратах, нерудных материалах и невосстановленными во время плавки.

Шлаковые процессы сопровождаются образованием значительного количества шлака. Кратность шлака может составлять 1,2 - 1,5 при выплавке высокоуглеродистого ферромарганца и силикомарганца и 2,5 - 3,5 при получении феррохрома и металлического марганца силикотермическим способом [35].

Наконец, процессы делятся на непрерывные и периодические.

Непрерывные и периодические процессы. Ферросплавные процессы подразделяются на непрерывные и периодические. Непрерывные процессы характеризуются непрерывной загрузкой шихты в рудовосстановительную электропечь с закрытым колошником и периодическим (или непрерывным) выпуском ферросплава и шлака. Шихта расположена в печи все время на определенном уровне. Электроды постоянно погружены в шихту, а выпуск металла и шлака ведется периодически или непрерывно. При этом используют печи большой электрической мощности (16,5— 75 МВ·А), а в качестве восстановителя применяют углеродные материалы.

Колошником называют верхний слой шихты, находящейся в печи и расположенной при непрерывном процессе практически все время на одном и том же уровне. По мере схода (опускания) шихты ведется загрузка ее преимущественно к электродам, вокруг которых шихта располагается конусом. Верхний уровень конуса 0,3—0,5 м выше уровня шихты на периферии колошника. В герметичных печах типа РПГ-63 шихта подается на колошник между электродами. В процессе работы печи в результате восстановления оксидов шихты углеродом образуется большое количество монооксида углерода СО, содержание которого в газовой фазе составляет 80—95%. В результате местного концентрированного выхода газов в одном месте колошника могут образоваться «свищи», которые стараются сразу же засыпать свежей шихтой. При работе печи с закрытым колошником подводимый по электроду ток ($I_{эл}$) проходит через дуговой разряд (I_d) и последовательно расположенное с ним сопротивление ванны (I_o), часть тока с верхней части электрода стекает с боковой его поверхности на токопроводимую шихту (ток шихтовой проводимости). При непрерывном процессе дуговой разряд получает значительное развитие и тогда большая часть тока проходит через дугу, что обуславливает высокую концентрацию тепловой энергии и необходимые температурные условия для развития восстановительных процессов.

Размеры газовой полости вокруг нижнего (рабочего) конца электрода зависят от распределения тока между шихтой и электрической дугой. Чем меньше электрическое сопротивление шихты, тем больший ток идет через шихту от одного электрода к другим (в печи с тремя электродами), к углеродистым блокам, расположенным в стенах печи, к расплаву шлака и металла, находящимся на подине печи. Электрическое сопротивление шихты зависит от количества углеродистого восстановителя в ней, его электрического сопротивления, а также от температуры появления в шихте жидкой фазы и ее количества.

Рудная (оксидная) часть шихты включает простые или сложные минералы с определенной температурой плавления. Простой минерал состоит из кристалла, образуемого одним оксидом, например SiO_2 , сложный минерал представлен химическим соединением двух или более оксидов различных элементов. Чем выше температура плавления минеральной части шихты и меньше количество жидкой фазы в шихте (при постоянном массовом соотношении углеродистого восстановителя и оксидной части), тем большая

доля электрического тока проходит через дугу, образуя газовую полость вокруг электрода. Форма и размеры газовой полости вокруг рабочего конца электрода зависят также от температуры появления жидкой фазы в минеральной части шихты и ее количества [36].

Различные минералы в оксидной (рудной) части плавятся при разных температурах. При высокой температуре плавления минералов жидкая оксидная фаза (шлак) образуется в самых горячих (нижних) горизонтах шихты, и газовые полости под электродами получают значительное развитие. Продукт химических реакций (металлический расплав) скапливается на подине печи, если плотность металлической фазы больше плотности оксидного расплава. Если восстанавливаемый элемент (ферросплав) имеет плотность, меньшую плотности оксидного расплава (кремний, силикоалюминий, силикокальций), металлический расплав располагается в печи в отдельных зонах, сообщаемых узкими каналами между собой. Выпуск ферросплава из печи производится, как правило, через определенные промежутки времени (1,0—1,5 ч) или непрерывно (кристаллический кремний, силикоалюминий).

Непрерывный выпуск металла способствует поддержанию устойчивой работы печи с низкой посадкой электродов в шихте, а восстановленные элементы в течение меньшего промежутка времени находятся в контакте с СО газовой фазы, и вторичное карбидообразование в результате окисления уже восстановленных элементов монооксидом углерода получает меньшее развитие. Температура оксидного и металлического расплава, находящихся в печи, определяется температурой плавления шихты. Практически вся подводимая дополнительная мощность расходуется на физико-химические процессы плавления и восстановления оксидов углеродом, протекающие с поглощением большого количества тепла.

Непрерывный процесс характеризуется рациональным использованием тепла, получаемого при подводе электрической энергии в ванну печи; расплав оксидов и металла всегда закрыт слоем шихты, потери тепла открытой поверхностью расплава отсутствуют. Тепло отходящих газов частично расходуется на нагрев шихтовых материалов, в результате этого в шихте идут процессы удаления летучих веществ, гидратной и гигроскопической влаги, начинаются процессы восстановления оксидов в твердых фазах, обеспечиваются теплом эндотермические реакции, протекающие на поверхности углеродистого восстановления при контакте конденсированных высших и газообразных низших оксидов элементов.

Периодические процессы ведут с использованием определенного количества шихтовых материалов, предназначенных для одной плавки. Загруженная в печь шихта полностью проплавляется с восстановлением оксидов ведущих элементов. Выпуск продуктов плавки (металла и шлака) ведут периодически; чаще всего выпускают из печи металл и шлак одновременно.

4 Ферросилиций

Ферросилиций - легирующий сплав железа и кремния с минимальным содержанием кремния 80% по массе и максимальным - 95% по массе, полученный путем восстановления.

Кремний является сильным раскислителем; это свойство и определяет главное направление применения его в металлургии. За исключением «кипящей» мартеновской стали, кремний применяется при производстве всех марок стали как раскислитель и в некоторых сталях как легирующий элемент. Расход кремния в пересчете на 45%-ный ферросилиций составляет в среднем 0,3% от всего количества производимой стали. Это дает представление об огромной потребности сплавов кремния для черной металлургии [37].

Обычно в стали содержится до 0,35% Si; стали с большим содержанием кремния относят к легированным кремнистым сталям.

Добавка в сталь около 1,30 - 2% Si повышает предел ее текучести и упругость, процент удлинения и сжатия площади поперечного сечения при высоком ударном сопротивлении.

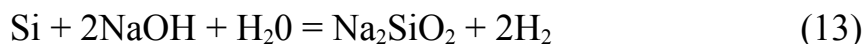
Такая сталь используется как конструкционная.

Стали с более высоким содержанием кремния (2,5 - 4,2%) и низким содержанием углерода (не более 0,1%) обладают небольшим остаточным магнетизмом и применяются при производстве сердечников трансформаторов и в динамомашинах.

В комбинации с другими элементами, особенно хромом, кремний применяется также в инструментальных и жароупорных сталях. В табл. 5 приведен химический состав некоторых марок стали, легированных кремнием.

Применение кремния (ферросилиция) в металлургии не ограничивается производством стали. Высокое сродство кремния к кислороду используется для восстановления различных окислов при производстве ферросплавов с низким содержанием углерода — феррохрома, ферромolibдена, ферромарганца.

Ферросилиций с высоким содержанием кремния применяется для получения водорода по реакции:



Технически чистый кремний используется также в цветной металлургии (кремнистые бронзы, силумин и т. д.) [38].

4.1 Явление рассыпания ферросилиция

В процессе развития производства ферросилиция было установлено, что некоторые его сорта легко рассыпаются в порошок.

Рассыпание ферросилиция сопровождается выделением большого количества газов, главным образом водорода, фосфористого водорода РНЭ

имышьяковистого водорода AsH_3 . Последние два газа сильно ядовиты. Их присутствие легко определяется по резкому чесночному запаху.

Этими исследованиями было установлено, что рассыпаются не все сорта ферросилиция, а лишь содержащие от 33,3 до 75% Si, и особенно сплавы, содержащие 50—60% Si. Поэтому стандартом для производства ферросилиция предусмотрены такие сплавы, которые наименее склонны к рассыпанию (45%, 75% и 90% Si).

Лабораторным исследованием установлено, что чистые сплавы железа с кремнием не рассыпаются на воздухе независимо от количества содержащегося в них кремния. Также не рассыпаются сплавы с 0,03—0,04% P и сплавы, содержащие до 3% Al; но одновременное присутствие в сплаве 0,03—0,04% P и 3% Al вызывает быстрое распадение во влажном воздухе. Быстрое охлаждение препятствует распадению сплава, медленное, наоборот, усиливает его [39].

4.2 Сортамент ферросилиция

Применяемый в металлургии ферросилиций имеет состав, обусловленный двумя ГОСТ:

- ферросилиций доменный — ГОСТ805—41
- ферросилиций электротермический — ГОСТ 1415—49.

Наряду с перечисленными сортами ферросилиция в последнее время в электрических печах выплавляется ферросилиций с 18—25% Si.

Ферросилиций, содержащий до 45% Si, применяется в основном для раскисления стали.

Ферросилиций с 75—90% Si применяется для диффузионного раскисления стали через шлак, для легирования стали и при силикотермическом производстве ферросплавов.

Технически чистый кремний используется в цветной металлургии при выплавке различных сплавов (кремнистые бронзы, силумин и т. д.).

4.3 Сырые материалы для выплавки ферросилиция

Руды. Исходным материалом для получения ферросилиция служат различные минералы, содержащие кремнезем. Кремнезем в природе встречается в виде горного хрусталя, топаза, аметиста, кварца, кремня, халцедона, кварцитов, кварцевых песков, песчаника и т. л. Однако для получения ферросилиция обычно применяют далеко не все эти минералы. Одни из них — такие как горный хрусталь, топаз, аметист — не применяются в связи с тем, что являются редкими минералами, другие — песчаники и кварцевые пески — непригодны вследствие того, что слишком измельчены. Обычно для выплавки ферросилиция применяют наиболее дешевые и распространенные минералы, к которым относятся кварц, кварцит и халцедон [40].

Кварц - плотный минерал кристаллического строения, удельный вес 2,59—2,65, твердость 7, в большинстве случаев бесцветный, белый, серый или красноватый — в зависимости от примесей, содержащихся в нем.

Халцедон - тонковолокнистый, иногда пористый минерал, окрашенный в различные цвета. Удельный вес и твердость - те же, что и у кварца.

Кварцит - горная порода, состоящая из зерен кварца, промежутки между которыми заполняет цементирующее вещество, которое содержит, главным образом, кремнезем).

Эти минералы весьма распространены. При выборе месторождений кремнесодержащих минералов следует исходить из того, что для плавки ферросилиция пригодны только те из них, в которых содержится не менее 95% кремнезема при минимальном количестве остальных примесей: глинозема, окиси магния и окиси кальция. Особое внимание надо обращать на содержание P_2O_5 , которое в этих минералах не должно превышать 0,02%. В отношении содержания окислов железа нет ограничений, так как при получении ферросилиция необходимо в том или ином виде вносить в печь железо. Исключение составляет кристаллический кремний: производство его требует минералов с минимальным содержанием окислов железа.

Особое внимание должно быть обращено на механическую прочность кварцита, который не должен рассыпаться при дроблении и нагревании до температуры размягчения [41].

Кварц и кварцит, применяемые для плавки ферросилиция, предварительно дробят. Для промышленных печей наиболее целесообразны куски размером 50—100 мм.

Вся мелочь образующаяся при дроблении, должна отсеиваться через сито 20—30 мм. Попадание мелочи в печь нежелательно не только потому, что она снижает газопроницаемость шихты, но и потому, что она содержит повышенное количество примесей. Например, при обычном содержании глинозема в кварците не более 1,5% содержание глинозема в мелочи может превышать 20 %.

Восстановитель. В качестве восстановителя при получении ферросилиция применяют различные углеродсодержащие материалы: древесный уголь, нефтяной кокс, металлургический кокс, иногда — каменный уголь. Наилучшим восстановителем является древесный уголь, но вследствие высокой стоимости он применяется только при производстве высокопроцентною (более 90%) ферросилиция или кристаллического кремния.

Хорошим восстановителем является нефтяной и пековый кокс Их преимущества по сравнению с обычным коксом состоят в очень низком содержании золы (не выше 1—2%), отсутствии вредных примесей и большой пористости

Однако и эти восстановители из-за высокой стоимости применяют лишь при производстве кристаллического кремния.

Обычно в производстве ферросилиция используют кокс или сортированный коксик, получаемый с металлургических предприятий. Кокс должен содержать возможно меньше золы, так как зола неизбежно вносит в

шихту вредные примеси, способствующие шлакообразованию (глинозем, окись кальция) или загрязняющие сплав (фосфор) [42].

Содержание золы в металлургическом коксе обычно составляет 9—13%. В мелком коксе (коксите) содержание золы достигает 16 и даже 20%. Содержание влаги в коксе зависит от условий его перевозки и хранения и колеблется в широких пределах, доходя иногда до 25%. Во всех случаях надо стремиться применять кокс с наименьшим содержанием влаги и золы.

Величина кусков кокса оказывает влияние на электрический режим печи. Размеры кусков кокса должны подбираться в зависимости от мощности и вторичного напряжения печи. Так, например, для печей мощностью 7000 -10000 кВа при вторичном напряжении 140 - 180 в хорошие результаты дает кокс в кусках размером 10 - 25 мм. При более высоких напряжениях применяют восстановитель в кусках размером 5 - 15 мм.

При всех условиях коксик размером ниже 5 мм для производства ферросилиция не пригоден и должен отсеиваться.

Большинство ферросплавных заводов использует коксик, т. е. отходы коксовых заводов, непригодные для доменных печей.

В качестве восстановителя можно применять также каменные угли при условии невысокого содержания в них вредных примесей, а также золы и летучих. Они не должны рассыпаться при нагреве до высокой температуры.

Замена 20 - 30% коксика каменным углем уменьшает спекание шихты на колошнике и обеспечивает более глубокую посадку электродов.

Железосодержащие материалы. При производстве ферросилиция в шихту вводят железо в виде стальной стружки. Следует избегать применения стружки специальных сталей, загрязняющей сплав различными легирующими примесями, а также сильно окисленной стружки. Стружка должна быть в виде коротких кусков. Применение длинной витой стружки ухудшает результаты работы печи. Надо избегать также применения чугунной стружки, которая хотя и весьма удобна по своим размерам, но содержит повышенное количество фосфора.

Железо может быть введено в шихту в виде железных руд. Но так как руда вносит большое количество шлакообразующих и требует дополнительных затрат энергии на восстановление железа, применение ее нежелательно [43].

4.4 Технология процесса

Для производства ферросилиция применяют электрические печи — однофазные и трехфазные, мощностью от 2000 до 15000 кВа. В большинстве случаев мощность печей составляет 6000 кВа и более. Наибольшее распространение при производстве ферросилиция получили шахтные электрические трехфазные печи с набивными электродами. Подину и стены печи на высоту 400 - 800 мм изготавливают из угольных блоков.

В наиболее тяжелых условиях находится подина печи. Процесс получения ферросилиция протекает при высоких температурах, т. е. при перегреве

получаемого сплава значительно выше температуры его плавления; сплав в таком состоянии весьма жидкоподвижен и если не принять специальных мер при футеровке подины, то он легко проникает в щели между блоками, что приводит к быстрому разрушению подины. Угольные блоки подины и стен печи укладывают с таким расчетом, чтобы шов между ними составлял 25 - 30 мм. Швы между блоками плотно утрамбовывают специальной электродной массой (подовой) с повышенной температурой размягчения [44].

Для предохранения угольных блоков от окисления в период сушки и разогрева печи подину засыпают небольшим слоем кокса, а стены защищают слоем шамотового или dinasового кирпича. Сушку печи при новой футеровке производят вначале дровами, затем коксом; заканчивается сушка под током. При этом трансформатор включают на самое низкое напряжение.

По мере прогрева подины напряжение повышают, одновременно увеличивая мощность печи. Продолжительность сушки под током современной трехфазной печи мощностью 7000 - 10000 ква составляет 36 - 40 час. После сушки в печь начинают загружать шихту на 45%-ный ферросилиций. Следует иметь в виду, что слишком быстрая сушка и разогрев печи приводит к образованию трещин и пустот в швах вследствие бурного коксования массы, снижающего продолжительность работы ванны печи.

Контроль прогрева печи осуществляется путем наблюдения за температурой подины; для этого пользуются термопарой, закладываемой в трубе на уровне 100 - 150 мм от днища печи. После того, как температура подины печи устанавливается постоянной, разогрев печи можно считать полностью законченным.

Прогрев мощной электрической печи длится около 20 суток. После установления стационарного теплового режима печь можно переводить на выплавку 75%-ного ферросилиция.

Подготовка шихтовых материалов в соответствии с предъявляемыми к ним требованиями осуществляется на специальных шихтовых дворах.

Шихтовые материалы, поступающие из шихтового двора, распределяются по бункерам, расположенным на дозирочной площадке печи. Кварцит, коксик и железную стружку взвешивают в соответствии с составом колоши и тщательно перемешивают. Смешанную шихту засыпают в печные карманы, из которых она поступает на рабочую площадку.

Точная дозировка шихты в соответствии с качеством шихтовых материалов является важнейшим условием хорошей работы печи, выплавляющей ферросилиций.

В настоящее время загрузка шихты в печь производится в основном вручную.

Трудность механизации загрузки трехфазных ферросилициевых печей определяется неравномерным сходом шихты в различных частях колошника печи и необходимостью, в связи с этим, избирательной загрузки.

Испытание ряда предлагавшихся способов механизации загрузки шихты показало, что эти способы не обеспечивают избирательной загрузки и приводят,

кроме того, к расслоению шихты, составляющие которой имеют резко различный удельный вес.

Опыты в этом направлении продолжаются, и несомненно в недалеком будущем задача механизации загрузки шихты в печь будет решена.

Шихте вокруг электродов стараются придать конусообразный вид. Скатываясь по конусу от электродов, шихта распределяется равномерно в промежутках между электродами и стенками печи.

Такое расположение шихты препятствует прорыву газов у электрода. Вследствие того, что 60 - 70% мощности печи выделяется в электрических дугах и контакте «электрод — шихта», процесс плавки происходит главным образом вокруг электродов. Эту наиболее горячую зону печи вокруг электродов принято называть тиглем.

Для получения наилучших результатов работы печи необходимо стремиться к увеличению размеров тигля. Это достигается подбором соответствующего электрического режима, обеспечивающего наиболее глубокую посадку электродов, точной дозировкой шихты установленного габарита и равномерной загрузкой ее вокруг электродов.

Следует иметь в виду, что чем выше содержание кремния в сплаве, тем ниже должны быть расположены электроды [45].

При неравномерном расположении конуса шихты вокруг электрода нарушается правильное распределение газов, что приводит к зарастанию тигля спекшейся шихтой в одном месте и прорыву газов в виде свищей — в другом. Наиболее частой причиной образования настелей и свищей является загрузка в печь мелкого коксика и кварцита.

На одном из иностранных заводов была сделана попытка обеспечить равномерный ход плавки путем применения печи, вращающейся вокруг электродов.

В этом случае при очень медленном вращении печи (1 оборот в несколько суток) шихта, спекающаяся вокруг электродов, непрерывно разрыхляется, тепло распределяется более равномерно, что способствует нормальному сходу шихты.

Явление ненормального образования тиглей — не единственная причина плохого протекания процесса плавки.

Расстройство хода печи может произойти и по другим причинам. Так, при большом избытке восстановителя неизбежно образуется некоторое количество трудноудаляемого из печи тугоплавкого карборунда. Скопление в печи избытка коксика и электропроводного карборунда приводит к уменьшению глубины посадки электродов в шихте и, как следствие этого, к уменьшению размеров тигля и образованию свищей.

Не меньшую опасность представляет ошибка противоположного характера, т. е. когда в шихту дается слишком мало восстановителя и печь работает при наличии в ней избыточного количества кварца. В этом случае кремнезем не восстанавливается полностью и происходит так называемое закварцевание печи. В печи накапливается большое количество

оплавленного кварца, величина тиглей резко уменьшается и ход печи расстраивается [46].

Для предупреждения таких расстройств хода печи должны быть организованы тщательный контроль за качеством сырых материалов (особенно коксика, влага в котором может меняться в широких пределах) и своевременная корректировка шихты в зависимости от изменения качества сырых материалов.

Обычно электрическая печь при выплавке 45%-ного ферросилиция работает довольно спокойно. Это объясняется тем, что в этом случае в шихте имеется большое количество железной стружки, которая разрыхляет шихту, делает ее более газопроницаемой и облегчает восстановление кремния. Несколько труднее печь работает при выплавке 75%-ного ферросилиция, когда влияние железа, имеющегося в шихте, сказывается весьма слабо и условия восстановления приближаются к условиям восстановления кремния при отсутствии железа.

Переход с одного сорта ферросилиция на другой производится путем изменения количества железа и коксика в шихте.

Уменьшение избытка восстановителя в шихте при переходе на более богатый ферросилиций диктуется увеличением расхода электродов на единицу восстановленного кремния и необходимостью более глубокой посадки электродов в шихте.

При производстве 90%-ного ферросилиция и кристаллического кремния из-за невозможности иметь в шихте необходимый избыток восстановителя возникают еще большие трудности.

Эти трудности частично преодолеваются применением в качестве восстановителей пекового коксика и древесного угля, обладающих большей реакционной способностью и большим электрическим сопротивлением, а также подбором соответствующего электрического режима (при прочих равных условиях более низкого напряжения).

При получении кристаллического кремния особое внимание технолога должно быть обращено на предотвращение попадания железа в шихту. С этой целью в шихту дают самый чистый кварц, в качестве восстановителя применяют нефтяной кокс и древесный уголь, содержащие небольшое количество золы, избегают употребления железного инструмента и применяют графитовые электроды.

Большое значение при работе на электрической печи, выплавляющей ферросилиций, имеет правильный электрический режим. Прежде всего надо подобрать оптимальную ступень напряжения, которая определяется для каждого сплава мощностью печи, ее конструкцией, параметрами короткой сети и качеством сырых материалов.

В зависимости от этих факторов вторичное напряжение, применяемое при выплавке ферросилиция, колеблется в широких пределах от 130 и до 185 В.

Во время нормального процесса электрическая печь работает на постоянном напряжении, и регулирование мощности печи происходит за счет изменения силы тока, меняющейся в зависимости от положения электродов.

При опускании электродов сила тока возрастает, при поднятии — падает. В нормально работающей печи электроды должны быть по возможности неподвижны, вернее — они должны медленно опускаться по мере их сгорания.

Регулирование электродов может осуществляться вручную и автоматически, но и в том и в другом случае необходимо внимательно следить за положением электродов в печи, так как вследствие изменения электропроводности шихты могут быть случаи, когда электроды находятся на разной высоте, а соответствующие им амперметры дают одинаковые показатели. Такие случаи могут возникнуть при попадании избыточного восстановителя или при заваривании под каким-либо одним электродом.

Особое внимание должно быть уделено организации работы у горна. Электрическая печь при производстве ферросилиция работает непрерывно, и металл выпускается из печи периодически, по мере его накопления.

Из печей большой мощности обычно делают 6 - 8 выпусков в смену; слишком частые выпуски производить нецелесообразно, так как это приводит к увеличению потерь металла при разделке; с другой стороны, нельзя накапливать в печи слишком большое количество металла, так как при этом нарушается нормальный ход печи.

Металл выпускают через выпускное отверстие - летку в горне печи. Хорошо заделанная летка открывается очень легко железным ломом; в крайнем случае, если летку не удастся открыть таким способом, ее прожигают электрической дугой с помощью специальной прожигательной машины, состоящей из электрода и устройства для подвода его к летке. Прожигание летки рекомендуется и в тех случаях, когда ее удалось легко открыть. Это делается для того, чтобы расширить отверстие летки и обеспечить более быстрый выход металла из печи. Продолжительность выхода металла нормально составляет 10 - 12 мин.; после этого выпуск производить нецелесообразно, так как если металл и продолжает идти из печи, то очень тонкой струей.

Во время выпуска берут пробу металла, подставляя стаканчик под струю.

При заделывании летки надо обратить особое внимание на тщательную очистку ее от шлака и приставшего металла. У плохо расчищенной летки в процессе плавки образуется «козел», который затрудняет разделку летки, что приводит к нарушению нормального хода плавки.

Летку прочищают деревянной жердью или железным прутом; можно дополнительно прожечь отверстие летки, после чего забить деревянной конической пробкой или конусом, приготовленным из электродной массы. Конус стараются забивать как можно дальше, так как близко расположенная пробка может послужить причиной прогара кожуха печи. В заключение летку замазывают глиной.

Выпуск ферросилиция в большинстве случаев производят в плоскую изложницу — литую чугунную или сваренную из листового железа, футерованную внутри тонким слоем шамотного кирпича и поверх его слоем песка на 50 - 60 мм; иногда изложницу засыпают отсевами ферросилиция. В

месте падения струи металла в дно изложницы заделывается угольный блок, предотвращающий размывание футеровки жидким сплавом.

Емкость изложницы подбирают в соответствии с количеством выпускаемого металла. На отдельных заводах изложница, футерованная огнеупором, заменяется угольной чашей; необходимость футеровки в этом случае отпадает.

При выборе изложницы для выпуска ферросилиция надо учитывать, что ферросилиций имеет значительную склонность к ликвации кремния. Разница в содержании кремния в различных частях застывшего блока 75%-ного ферросилиция иногда доходит до 20%. Для уменьшения ликвации надо выбирать размеры изложницы таким образом, чтобы блок не был очень толстым и сплав быстро застывал.

На отдельных заводах применяют изложницы с чугунным дном и стенками. В этом случае благодаря большой теплопроводности чугунных стенок сплав застывает очень быстро.

Разделка готового сплава производится после его охлаждения и извлечения из изложницы. Обычно блок ферросилиция легко разваливается на куски. В частях соприкосновения металла с футеровкой изложницы поверхность его загрязнена пристывшим песком, поэтому все куски сплава подвергают очистке от этого песка.

Для получения чистой поверхности слитка подбирается мелкий кварцевый песок, содержащий не менее 98,5% SiO_2 . Песок, очищенный от слитка, не должен вновь употребляться для футеровки.

Значительно труднее отделение шлака от металла. Шлак, вышедший вместе с металлом из печи, плотно приваривается к нему и удаление его сопряжено с большими потерями сплава.

5 Экспериментальная часть

5.1 Ферросиликоалюминий

На производстве ПФ ТОО "Кастинг" была опробована опытно-промышленная партия ферросиликоалюминия марок ФС55А10 и ФС65А10 производства ПФ ТОО "KSPSteel" применяемого в качестве заменителя ферросилиция, а также материала улучшающего механические свойства производимых сталей.

Сталь - сплав железа (97,0 - 99,5%) и углерода (до 2%) с примесями марганца, кремния, серы, фосфора, кислорода, азота, водорода, а также случайных примесей (хром, никель, медь и др.)

Ферросилиций - легирующий сплав железа и кремния с минимальным содержанием кремния 80% по массе и максимальным - 95% по массе, полученный путем восстановления.

Ферросиликоалюминий - сплав Si, Al и Fe (три самых распространенных после кислорода элемента в земной коре), который при выплавке стали может заменять раскислители, давно ставшие традиционными - алюминий и ферросилиций. Одно из преимуществ ФСА - более низкая стоимость, чем у традиционных раскислителей, обусловленная тем, что при электротермической плавке ФСА довольно большое количество алюминия восстанавливается попутно с Si и Fe, и при этом затраты на электроэнергию для восстановления алюминия вдвое меньше, чем при электролизе. Раскислительная способность ФСА выше, чем у отдельных раскислителей - алюминия или ферросилиция. Раздельное раскисление стали кремнием и алюминием приводит к образованию оксида кремния и оксида алюминия - твердого силиката и корунда, которые малоспособны к коагуляции и затрудненно удаляются в шлак. Это приводит к загрязненности стали строчечными силикатами и корундом кристаллической остроугольной формы и соответствующему ухудшению механических свойств.

В шихту вводят дополнительно кварцит и небольшое количество стальной стружки, кроме того, железо вносится в сплав стальными кожухами непрерывных самообжигающихся электродов и инструментом при обслуживании выпускного отверстия. Исследованиями установлено, что угольные отходы хорошо выдерживают температурное воздействие в верхних горизонтах колошника печи и исходная фракция угля сохраняет первоначальную форму. Одним из вариантов процесса является восстановление оксидов кремния и алюминия углеродом кокса из агломерата боксита (или другого алюмосиликатного сырья) в присутствии стальной стружки. Вместо нее можно частично использовать ферросилиций (ФС25, ФС45 и т. д.). Более целесообразна плавка с заменой боксита и кварцита отвальными породами высокозольных углей (45 - 75% золы с 30 - 40% Al_2O_3 и 45 - 55% кремнезема при 15 - 20% твердого углерода и по 10 - 15% летучих), например Экибастузского месторождения. Тогда в качестве металлической части шихты вводят стальную стружку и ферросилиций или только стружку. Возможен и силикотермический (периодический) процесс выплавки сплава ФСА, но в

таком случае образуется шлак с высоким содержанием Al_2O_3 и высокой температурой плавления.

Сплав Fe—Si—Al (ФСА) является комплексным раскислителем стали и восстановителем, используемым при силикоалюминотермических процессах получения ферросплавов (ферромolibдена, феррованадия и т. д.). Для получения этого сплава используют непрерывный процесс плавки в рудовосстановительных печах мощностью 16,5—33 МВ·А. Шихту составляют из высокочерных отходов обогащения углей, например, Экибастузского месторождения. Эти отходы содержат 49-74% золы, 12-18% летучих, 3-8% влаги и 14-35% твердого углерода. В таблице 2 показаны содержание компонентов минеральной части.

Таблица 2 - Содержание компонентов минеральной части

Компоненты минеральной части	%
SiO_2	62—66
Al_2O_3	30—33
CaO	0,5—1
MgO	0,2—0,8
FeO	2—4
P	0,05—0,14

При выплавке ФСА химический состав сплава целесообразно выбирать, исходя из соотношения Al:Si, необходимого для раскисления спокойной стали массового сортамента. Одним из критериев выбора состава сплава является необходимость получения сплава с большой плотностью и устойчивого против рассыпания при хранении. Соотношение Si:Al в сплаве наиболее целесообразно поддерживать в пределах (4 - 6): (1,5 - 1) при 8 - 15% Al в сплаве. При этом суммарное содержание кремния и алюминия должно соответствовать количеству кремния в стандартном ферросилиции марок ФС45, ФС65 и ФС75, а фосфора должно быть <0,07%. В ряде стран производится ферросиликоалюминий с 40 - 45% Si и 18 - 22% Al под названием фералсит. Алсмин имеет состав, %: 35 - 37 Si, 48 - 50 Al, 13 - 17 Fe, 0,4 O₂. Сплав симанал содержит примерно по 20% кремния, марганца и алюминия.

Применение ферросиликоалюминия при раскислении стали широкого сортамента привело к улучшению качества стали и увеличению усвоения алюминия (на 30—60%).

Ферросиликоалюминий выпускается в виде кусков неправильной формы. В зависимости от химического состава устанавливают следующие марки ферросиликоалюминия: ФС55А10, ФС 55А15, ФС55А20, ФС45А10, ФС45А15, ФС45А20.

В ходе проведения эксперимента выплавлено и обработано сто сорок две плавки (марки стали 70Г, 35 ГС, шаровая сталь) и израсходовано 4,64 тонн материала ферросиликоалюминия (марки ФС55А10 - 2,43 тонн, марки ФС65А10 - 2,21 тонн). Выход годной продукции составил 3627 тонн.

В таблице 3 показан химический состав ферросиликоалюминия.

Таблица 3 - Химический состав ферросиликоалюминия

Марка	Массовая доля, %	
	Кремний	Алюминий
ФС55А10	53,5 - 57,5	7,5 - 12,5
ФС55А15	53,5 - 57,5	12,5 - 17,5
ФС55А20	53,5 - 57,5	17,5 - 22,5
ФС45А10	42,5 - 47,5	7,5 - 12,5
ФС55А15	42,5 - 47,5	12,5 - 17,5
ФС45А20	42,5 - 47,5	17,5 - 22,5

Химический состав с проб шлака отобранных в конечном периоде внепечной обработки плавов с использованием ферросиликоалюминия представлен в таблице 4.

Таблица 4 - Химический состав с проб шлака отобранных в конечном периоде внепечной обработки плавов с использованием ферросиликоалюминия

Плавки	Fe _{об}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	Основность	Σ
Среднее значение экспериментальных плавов	1,1	26,3	1,05	48,8	9,7	6,1	0,8	1,9	94,0
Среднее значение сравнительных плавов декабрь-январь 2014г.	0,9	28,1	0,7	54,1	6,9	2,7	0,7	1,9	94,3
Разница	0,3	-1,7	0,3	-5,7	2,8	3,7	0,2	-0,1	-0,3

Химический состав ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и марки ФС65А10, использованный в ПФ ТОО "Кастинг" представлен в таблице 5.

Таблица 5 - Химический состав ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и марки ФС65А10

Марка ФСА	Si, %	Al, %	P, %	S, %
ФС55А10	41,9	10,1	0,025	0,003
	44,6	10,09	0,042	0,07
	53,5-57,5	7,5-12,5	не более 0,7	не более 0,2
ФС65А10	67,5	12,2	0,042	0,005

Материал присаживался во время выпуска металла с тепловых агрегатов Дуговая сталеплавильная печь №2 (ДСП№2) и дуговая сталеплавильная печь №3 (ДСП№3) в сталеразливочный ковш в количестве 20-50 кг на плавку, а

также на агрегат ковш-печь (АКП) в составе шлаковой смеси в количестве 40 кг (на две плавки).

По ходу проведения эксперимента было определено оптимальное количество присаживаемого материала:

- для шаровой стали и стали 70Г - не более 40 кг на плавку (1,6 кг/тн годного);

- для стали 35 ГС - 20-30 кг на плавку (1 кг/тн годного).

При увеличении дозировки ферросиликоалюминия, а также при добавке его в составе шлаковой смеси на АКП, наблюдалось падение скоростей разливки на МНЛЗ (до 0,6 м/мин). В условиях разливки "открытой струей" присаживание ферросиликоалюминия избыточного количества влечет за собой зарастание канала стакан-дозатора промежуточного ковша оксидами алюминия и, следовательно, потери серийности разливки металла (снижение производства). Средний расход ферросиликоалюминия на экспериментальных плавках представлен в таблице 6.

Таблица 6 - Средний расход ферросиликоалюминия на экспериментальных плавках

Марка выпускаемой стали	Расход FeSiAl, кг/тн	Расход FeSi, кг/тн	Общий расход, кг/тн	Фактический расход FeSi, кг/тн	Разница, кг/тн
70Г	1,6	1,3	2,9	3,2	-0,3
35ГС	1,2	8,3	9,5	9,8	-0,4
Шаровая сталь с Cr	1,6	1,4	3,0	3,3	-0,3

Во время разливки стали с ферросиликоалюминием наблюдалось повышенное образование "настылей" на стакан-дозаторах промежуточных ковшей. Химический состав ферросиликоалюминия должен соответствовать требованиям, указанным в таблице 7.

Таблица 7 - Химический состав ферросиликоалюминия

Марка	Массовая доля, %	
	Кремний	Алюминий
ФС55А10	53,5-57,5	7,5-12,5
ФС55А15	53,5-57,5	12,5-17,5
ФС55А20	53,5-57,5	17,5-22,5
ФС45А10	42,5-47,5	7,5-12,5
ФС55А15	42,5-47,5	12,5-17,5
ФС45А20	42,5-47,5	17,5-22,5

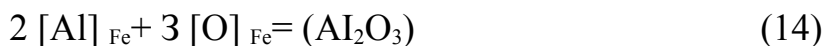
Содержание серы в ферросиликоалюминии всех марок должно быть не более 0,02, фосфора - не более 0,07 (массовая доля, %).

Применяемый "универсальный" раскислитель (алюминий+кремний) за счет комплексных соединений кремнезема с глиноземом, которые легко объединяются в жидком металле, образует более крупные шлаковые частицы, легко всплывающие в шлак и как следствие обеспечивающие чистоту стали.

Согласно извещений анализа макроструктуры поперечного темплета средний бал по точечной неоднородности на десяти плавках составил 1,55 единиц, при сравнении с декабрем 2013г. средний бал - 2 единицы, таким образом снижение на 22,5%.

5.2 Свойства алюминия и его соединений

Алюминий обладает значительным химическим сродством к кислороду, что определяет его широкое применение в качестве раскислителя при производстве стали. Для реакции:



$$\lg K_{\text{Al}} = \lg ([\alpha_{\text{Al}}]^2 [\alpha_{\text{O}}]^3) = (-59560/T) + 17,71 \quad (6)$$

При 1873 К $\lg K_{\text{Al}} = -14,09$, что свидетельствует о его высокой раскислительной способности.

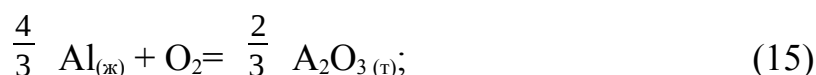
Алюминий — металл третьей группы Периодической системы элементов Д. И. Менделеева — был впервые выделен в чистом виде в 1825 г. В 1854 г. алюминий получили в промышленных условиях взаимодействием натрия и хлорида алюминия. Н. Н. Бекетов в 1865 г. предложил способ производства алюминия путем взаимодействия магния и криолита. В 1874 г. во всем мире было выплавлено всего 3,5 т алюминия вследствие ограниченности применения и высокой стоимости металла. С конца 80-х годов XIX в. начали получать его электролизом глинозема, растворенного в расплавленном криолите. Этот метод и в настоящее время является основным. Применяют алюминий для раскисления и модифицирования структуры стали, регулирования роста зерна аустенита с повышением пластичности и вязкости стали. Известен ряд сталей, подвергающихся последующему азотированию. При легировании стали алюминием уменьшается возможность возникновения подкорковых пузырей, а измельчение зерна способствует увеличению ударной вязкости продольных образцов. Применение чистого (первичного) алюминия для раскисления стали ограничено высокой его стоимостью, а вторичный алюминий может содержать до 13% примесей (цинка, олова, кремния, меди, мышьяка и других), ухудшающих качество стали. Применение алюминия, обладающего небольшой плотностью, снижает его полезное использование. До 70—90% алюминия окисляется под действием кислорода воздуха и шлака, а остаточное содержание его в стали нестабильно, поэтому целесообразнее для раскисления и легирования стали выплавлять ферроалюминий и другие сплавы (Fe—Mn—Al, Fe—Al—Si, Fe—Al—Mn—Si, Fe—Cr—Al и т. д.). Это позволяет для получения

подобных алюминиевых ферросплавов применять электротермический метод, восстанавливая алюминий в рудовосстановительных печах с использованием распространенного и дешевого алюминиевого сырья — алюмосиликатов, исключив дорогие и дефицитные бокситы. Применение для раскисления стали ферроалюминия с 10—30% Al увеличивает полезное использование алюминия до 50—90% и более; кроме того, наблюдается высокая стабильность усвоения алюминия. Раскислительная способность элементов комплексных сплавов с алюминием (ФСА) значительно выше раскислительной способности чистых элементов.

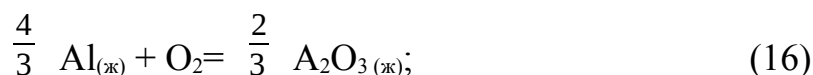
Комплексные алюминиевые сплавы рассматриваются как исходное сырье для получения чистого алюминия. Алюминий имеет следующие физико-химические свойства: атомная масса 26,98; ковалентный радиус 0,118 нм; атомный радиус 0,143 нм; ионный радиус 0,086 нм; валентности 3, 2, 1; кристаллическая решетка гетероциклическая; плотность при 293 К (99,996%) 2,6989 г/см³; при 1273 К (99,75%) 2,289 г/см³; температура плавления (99,996%) 933,23 К; кипения 2773 К; теплота плавления 389,7 кДж/кг; удельное электрическое сопротивление 0,265 Ом·м.

В природе алюминий встречается в виде Al₂O₃. При высоких температурах большую роль играют оксиды AlO, Al₂O и Al₂O₂, находящиеся вероятнее всего только в газообразном состоянии, хотя имеются данные о самостоятельных конденсированных Al₂O и AlO.

Высший оксид Al₂O₃ плавится при 2326 К; ΔH_{пл} = 113,13 кДж/моль. Известны несколько модификаций Al₂O₃: гексагональный α-корунд, тетрагональные γ- и δ- корунд. Температура «кипения» Al₂O₃ равна 3930 К, хотя она чисто условна, так как молекула Al₂O₃ в газообразном состоянии не существует. При 2000 К над чистым Al₂O₃ состав газовой фазы следующий, % (объемн.): Al 38,76; O₂ 57,53; O 1,29; Al 1,78; Al₂O₃ 0,63 и Al₂O₂ 0,0007. Для реакций образования оксидов алюминия значения ΔG°_T следующие:

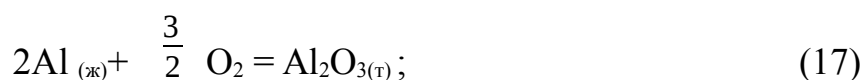


$$\Delta G^\circ_T = -1133430 - 10,47 T \lg T + 257,6 T \quad (923-2303 \text{ К}); \quad (7)$$



$$\Delta G^\circ_T = -636210 - 10,47 T \lg T + 223,6 T \quad (2303-2680 \text{ К}); \quad (8)$$

По другим данным (1500-2000 К):



$$\Delta G^\circ_T = -1681500 + 322,25 T; \quad (9)$$



$$\Delta G^\circ_{\text{T}} = 14650 - 55,70 \text{ T}; \quad (10)$$



$$\Delta G^\circ_{\text{T}} = -106930 - 54,72 \text{ T}. \quad (11)$$

Восстановление оксидов алюминия углеродом связано с образованием сложных оксикарбидов и карбида алюминия, имеющих высокую устойчивость в присутствии некоторых других оксидов и металлов. Особенно важное значение имеет образование оксикарбидов, что делает невозможным получение чистого алюминия электротермическим методом. Выплавка его сплавов с другими элементами также осложняется образованием оксикарбидов при восстановлении Al_2O_3 углеродом в результате взаимодействия Al_2O_3 и Al_4C_3 . Карбид Al_4C_3 можно получить при высоких температурах (1500—2000 К) по реакции:



$$\Delta G^\circ_{\text{T}} = -174095 + 21,36 \text{ T} \quad (12)$$

Во время реакции происходит передача трех валентных электронов от атомов алюминия ($3s^1p^2$) атомам углерода ($2s^2p^2$). Ионы Al^{3+} и C^{4-} имеют заполненные p^6 -оболочки. Взаимодействие ионов согласно закону Кулона приводит к возникновению шести валентных связей между ионами, имеющими валентную решетку. Избыток атомов металла в $\text{Al}_4^{3+} \text{C}_3^{4-}$ сообщает карбиду металлическую проводимость. Последнее обстоятельство важно, так как образование Al_4C_3 в печах для выплавки алюминиевых сплавов, приводит к увеличению электрической проводимости шихты, особенно настыли на подине печи, и создает трудности в ведении непрерывного процесса плавки.

В присутствии Al_2O_3 карбид алюминия образует $\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$ и Al_2OC — устойчивые оксикарбиды алюминия. Al_4C_3 взаимодействует с SiO_2 и металлами. В атмосфере CO Al_4C_3 устойчив, но взаимодействует с CO_2 и другими окислителями. С водой Al_4C_3 образует $\text{Al}(\text{OH})_3$ с выделением углеводородов. При этом происходит значительное увеличение объема (примерно в 1000 раз), а соединения и сплавы, содержащие Al_4C_3 , рассыпаются. $\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}_{(\text{конд})}$ получается при восстановлении Al_2O_3 углеродом при 1873 К при 2273 К с большой скоростью восстановление протекает до $\text{Al}_2\text{OC}_{(\text{конд})}$.

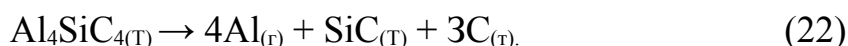
Тетраоксикарбид $\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$ устойчив до 2100 К. Монооксикарбид Al_2OC распадается по перитектической реакции при 2273 К, хотя при высоких молярных концентрациях Al_2O_3 (>50%) он существует в широкой области температур (1900—2500 К). При более высоких температурах Al_2OC возгоняется. В системе Al—O—C конденсированная фаза Al_2O или AlO не обнаружена. Установленные параметры решетки и другие свойства Al_2OC совпадают с данными для Al_2O , опубликованными в более ранних работах

В системе Al—Si—C обнаружено соединение $2\text{Al}_4\text{C}_3\cdot\text{SiC}$, которое при 2270—2370 К разлагается по реакции:



где ж — жидкая фаза Al—Si, насыщенная углеродом.

Растворимость алюминия и кремния в $2\text{Al}_4\text{C}_3\cdot\text{SiC}$ незначительна. Соединение Al_4SiC_4 при нагревании диссоциирует по реакции:



Давление пара алюминия (Па) над продуктами реакции диссоциации описывается выражением:

$$\lg p (\text{Па}) = -18576/T + 12,143. \quad (13)$$

Стандартная энтальпия образования Al_4SiC_4 из карбидов алюминия (Al_4C_3) и кремния (SiC) $\Delta H^\circ = -38$ кДж/моль.

Сравнение восстановления Al_2O_3 и SiO_2 углеродом согласно термодинамическим закономерностям приводит к следующим результатам. При диссоциации оксидов алюминия и кремния необходимо затратить (на 1 моль оксида):



$$\Delta G^\circ_{2000\text{K}} = 1681500 \text{ Дж/моль } \text{Al}_2\text{O}_3; \quad (14)$$



$$\Delta H^\circ_{2000\text{K}} = 936830 \text{ Дж/моль } \text{SiO}_2. \quad (15)$$

При пересчете значений $\Delta G^\circ_{2000\text{K}}$ на 1 моль кислорода $\Delta G^\circ_{2000\text{K}} = 560500$ Дж/моль (для Al_2O_3); $\Delta G^\circ_{2000\text{K}} = 468415$ Дж/моль (для SiO_2). Если рассчитать значения $\Delta H^\circ_{\text{T}}$ на 1 г алюминия и кремния, то получим $\Delta H^\circ_{2000\text{K}} = 31140$ Дж/г алюминия; $\Delta H^\circ_{2000\text{K}} = 33450$ Дж/г кремния. При таком расчете сделаны допущения о невозможности испарения соединений или элементарных алюминия и кремния. Оказалось, что различие прочности оксида при получении восстанавливаемого элемента, оцениваемого по количеству затраченного тепла для алюминия и кремния, незначительно. Поскольку реакции восстановления элементов с образованием растворов протекают с большей термодинамической вероятностью, чем при получении чистых элементов, то расход тепла (электроэнергии) при производстве сплавов на основе алюминия должен быть сравним с расходом тепла при получении кристаллического кремния. Действительно, при выплавке кристаллического

кремния в рудовосстановительных печах на 1 т расходуется 12—14 МВт·ч электроэнергии, а на 1 т сплава алюминия (60%) и кремния 13—13,5 тыс. кВт·ч. Если получать алюминий электролизом, расход электроэнергии на 1 т алюминия составляет 16,5—17 МВт·ч (без учета расхода электроэнергии на получение глинозема из боксита), что на 22% больше, чем при выплавке алюминиевых сплавов с кремнием. Это объясняется более высокой удельной мощностью рудовосстановительных печей по сравнению с электролизерами и уменьшением тепловых потерь. Если при этом учесть значительно большую производительность рудовосстановительных печей, исключение потерь электроэнергии при преобразовании переменного тока в постоянный, использование дешевых алюмосиликатов, отсутствие затрат электроэнергии при производстве глинозема из бокситов и резкое уменьшение капитальных затрат на строительство цеха с мощными рудовосстановительными печами по сравнению со строительством электролизного цеха и цеха кристаллического кремния равной мощности, уменьшение расхода фтористых солей и электродной массы, то экономическая эффективность получения алюминиевых сплавов прямым восстановлением углеродом не вызывает сомнений. Расчеты, проведенные для производства крупных масштабов, показали, что при выплавке силумина (12% кремния, остальное—алюминий) достигается снижение себестоимости сплава на 24%, повышение производительности труда на 41% и уменьшение капитальных вложений на 33%. С твердым железом алюминий образует алюминиды FeAl_6 , FeAl_3 , Fe_2Al_5 , FeAl_2 , Fe_3Al , с жидким железом — растворы, для которых $\Delta G^\circ_{\text{P}}$ (растворения) имеет следующие значения: $\Delta G^\circ_{\text{P}} = -62000 - 3,98 T$ ($x_{\text{Al}}=0,1$); $\Delta G^\circ_{\text{P}} = -59860 - 4,14 T$ ($x_{\text{Al}}=0,2$); $\Delta G^\circ_{\text{P}} = -55090 - 5,15 T$ ($x_{\text{Al}}=0,3$); $\Delta G^\circ_{\text{P}} = -50650 - 5,48 T$ ($x_{\text{Al}}=0,4$).

При восстановлении Al_2O_3 углеродом в присутствии железа образуется раствор системы Fe - Al, активность алюминия уменьшается, и восстановление глинозема происходит при пониженных температурах. В таблице 8 приведены значения активности алюминия в растворе систем Fe - Al и Fe - Al - Si - C (4% Si и 3% C).

Таблица 8 - Активность алюминия в системах Fe-Al и Fe-Al-Si-C (4% Si и 3% C) при 1873 К

Атомная доля алюминия	$\alpha_{\text{Al}}(\text{Fe-Al})$	$\alpha_{\text{Si, Al, C}}(\text{Fe-Al-Si-C})$
0,1	0,00189	0,00246
0,2	0,00428	0,00534
0,3	0,00810	0,0101
0,4	0,01540	0,0192
0,5	0,09425	0,118
0,6	0,165	0,206
0,75	0,24	0,300

Оксикарбиды и карбид алюминия интенсивно разрушаются железом, которое также увеличивает плотность, сплавов.

5.3 Сырые материалы для выплавки ферросиликоалюминия

В качестве исходного сырья для получения ферросиликоалюминия можно использовать аллиты, бедные бокситы с высоким содержанием кремнезема, каолины и, наконец, золу, полученную от горения бедных каменных углей и горючих сланцев.

При выборе глиноземсодержащего сырья для выплавки ферросиликоалюминия необходимо обращать особое внимание на содержание фосфора в этих материалах. При получении ферросиликоалюминия фосфор почти полностью переходит в сплав, делая его малоприспособным для раскисления стали и металлотермического восстановления.

Глиноземсодержащее сырье перед плавкой целесообразно просушивать и окучивать путем брикетирования или агломерации.

В качестве восстановителя при получении ферросиликоалюминия обычно используют древесный уголь.

5.4 Термодинамические основы получения ферросиликоалюминия

Процесс получения ферросиликоалюминия характеризуется следующими основными реакциями [47]:



$$\Delta F^\circ = 204100 - 86,20 \text{ T}; \quad (16)$$



$$\Delta F^\circ = 151865 - 83,73 \text{ T}. \quad (17)$$

Восстановленные алюминий и кремний образуют сплав, который вследствие высокой температуры процесса находится в сильно перегретом состоянии.

Теоретическая температура начала восстановления глинозема углеродом, при которой $P_{\text{CO}}=1$ ат, составляет 2368°K (2095°C).

Приведенные данные показывают, что реакция восстановления глинозема может протекать при более высокой температуре, чем реакция восстановления кремнезема, осуществление которой возможно при температурах порядка 1540°C .

При получении ферросиликоалюминия, когда имеет место совместное восстановление окислов алюминия и кремния, создаются более благоприятные условия для осуществления этих реакций в связи с тем, что восстановленный алюминий растворяется в кремнии.

Константа равновесия реакции (16), выраженная через парциальное давление окиси углерода, имеет следующий вид:

$$K = P_{CO}^2 \quad (18)$$

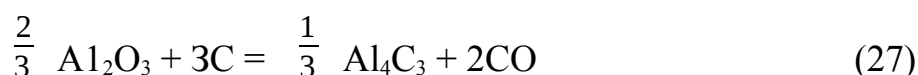
Пользуясь таблицей 9, определяем значения P_{CO}^2 при высоких температурах.

Таблица 9 - Термодинамические величины реакции восстановления глинозема

°K	ΔF°	$\lg K$	$\lg P_{CO}$	P_{CO}
1800	48940	- 5,9442	- 2,9721	$1,066 \cdot 10^{-3}$
1900	40320	- 4,6395	- 2,3197	$4,790 \cdot 10^{-3}$
2000	31700	- 3,4652	- 1,7326	$1,851 \cdot 10^{-2}$
2100	23080	- 2,4028	- 1,2014	$6,289 \cdot 10^{-2}$
2200	14460	- ,4370	- 0,7185	$1,912 \cdot 10^{-2}$
2300	5840	- 0,5551	- 0,2775	$5,278 \cdot 10^{-2}$
2400	- 2780	0,2532	- 0,1266	1,339

Температура процесса восстановления в этом случае понижается, однако она остается настолько высокой, что для нормального ведения плавки требуется очень горячий ход печи.

При восстановлении чистого глинозема углеродом может иметь место реакция [48]:



Уравнение свободной энергии которой в области высоких температур имеет следующий вид:

$$\Delta F^\circ = 192200 - 76,83 T. \quad (19)$$

Таким образом, термодинамическая характеристика этой реакции близка к данным реакции восстановления глинозема с образованием металлического алюминия. Процесс карбидообразования облегчается тем, что Al_4C_3 растворим в глиноземе и алюминии.

Однако, при нормальном ходе плавки ферросиликоалюминия, реакция образования карбида не имеет места, так как ее протеканию препятствует наличие кремния, железа и кремнезема.

В случае нарушения нормального хода процесса при резком увеличении избытка восстановителя и снижении содержания кремнезема в шихте реакция образования карбида алюминия может получить некоторое развитие.

5.5 Технология получения ферросиликоалюминия

Процесс получения ферросиликоалюминия может быть осуществлен в мощных шахтных электропечах, применяемых для получения ферросплавов.

Технология процесса весьма близка к технологии получения богатого ферросилиция.

Плавка ведется при горячем ходе печи с непрерывной загрузкой шихты при закрытом колошнике. Готовый сплав выпускается периодически по мере накопления его в печи. При нормальном ходе процесс идет практически без образования шлака.

Расчет шихты для получения силикоалюминия может быть произведен тем же методом, что и для высокопроцентного ферросилиция.

Глиноземсодержащее сырье выбирается в зависимости от заданного состава сплава по соотношению алюминия, кремния и железа.

В случае необходимости увеличения в сплаве содержания кремния или железа в шихту вводят соответственно кварцит или железную стружку. Кроме того, кварцит вводят в шихту в случае зарастания печи благодаря образованию карбидов алюминия и кремния.

Технология получения 30%-ного ферросиликоалюминия из каолинов, разработанная в ВАМИ В. Н. Веригиным, была использована Днепропетровским алюминиевым заводом для получения силумина. Шихта состояла из каолина, кварцевого песка и древесного угля.

Плавка велась непрерывным способом с периодическим выпуском сплава.

Ферросиликоалюминий содержал в среднем 25% Al; 74% Si; и 1 % Fe. На 1 т сплава расходовалось продуктов (таблица 10):

Таблица 10 - Расход продуктов на 1 т. сплава

Продукт	Количество
Каолин, т	1,8
Кварцевый песок, т	0,9
Древесный уголь, т	1,3
Электроды, т	0,24
Электроэнергия, квт·ч	10000 - 15000

Опыты по получению ферросиликоалюминия из золы минерального топлива впервые проведены В. П. Елютиным и Р. Н. Григорашем [21].

Основное преимущество золы перед другими содержащими глинозем материалами заключается в том, что в ней находится значительное количество углерода, который может быть использован в качестве восстановителя, благодаря чему снижается количество древесного угля в шихте.

Плавку вели в дуговой электрической печи мощностью 60 кВА периодическим процессом при 1700—1750°C.

Шихта состояла из золы челябинских углей и соответствующего количества восстановителя.

Полученный сплав содержал 18 - 22% Al; 40 - 47% Si; до 5% С и 0,2% Р.

Аналогичная работа проведена А. А. Яскевич и А. М. Самариним, которые в качестве сырья использовали золу подмосковных каменных углей. В результате плавок в лабораторной печи мощностью 60 кВа они получали сплавы с содержанием до 30% Al и 40% Si.

Процесс плавки богатого ферросиликоалюминия, содержащего до 75% Al, исследовали В. Н. Веригин и Н. А. Адрианов

Опыты проводились в однофазной дуговой печи мощностью 600 кВт с проводящей подиной.

В качестве глиноземосодержащего сырья были использованы каолин (38% Al_2O_3 , 46% SiO_2 , 0,5% Fe_2O_3) и богатые глиноземом отходы электролизного производства («сметки»). Шихта предварительно подвергалась брикетированию или агломерации.

Шихта загружалась в печь отдельными порциями, процесс велся при закрытой дуге. Сплав выпускали из печи через каждые 4 часа. Полученный силикоалюминий содержал 55-75% Al; 23-43% Si и 1-2% примесей (Fe, Ti, и др.)

5.6 Применение ферросиликоалюминия в черной металлургии

В состав ферросиликоалюминия входят кремний и алюминий, являющиеся сильными элементами-раскислителями, что и определяет направление использования этого сплава в черной металлургии

Ферроиликоалюминий как раскислитель имеет некоторые преимущества перед обычными раскислителями (ферросилицием к алюминием), так как при его применении образуются комплексные соединения кремнезема с глиноземом, которые легко объединяются в жидком металле, образуя более крупные шлаковые частицы, легко всплывающие в шлак, что приводит к уменьшению содержания неметаллических включений в стали.

Кроме того, ферросиликоалюминий может быть использован и в качестве восстановителя при металлотермических процессах получения металлов и сплавов, заменяя смесь ферросилиция с алюминиевой крупкой.

Преимущество ферросиликоалюминия здесь проявляется в том, что он легко дробится и размалывается в порошок, тогда как измельчение чистого алюминия сопряжено с некоторыми трудностями.

Ферросиликоалюминий может быть применен и в других отраслях промышленности; при термитной сварке, для засыпки головной части слитков стали и т. д. [49].

Главное преимущество ферросиликоалюминия заключается в том, что при электроотермическом получении этого сплава единица алюминия обходится дешевле, чем при получении чистого алюминия.

Если на 1 т чистого алюминия расходуется около 20000 кВт·ч электроэнергии, то на 1 т алюминия в ферросиликоалюминии, содержащем 18 - 22 % Al и 40-50% Si, расходуется максимум 13000 кВт·ч.

Ферросиликоалюминий может быть получен из сырья с пониженным содержанием глинозема и повышенным содержанием окислов железа и кремния, т.е. из сырья, которое при получении чистого алюминия считается некондиционным. В частности, сырьем могут служить золы некоторых углей. Таким образом, применения этого сплава в черной металлургии более рационально, чем использование металлического алюминия, поэтому можно рассчитывать, что производство ферросиликоалюминия будет расширяться.

Выплавка ферросиликоалюминия производится в ограниченных масштабах, поэтому ГОСТ на него еще не установлен.

Технические условия Министерства металлургической промышленности № 140-45 предъявляют следующие требования к силикоалюминию по химическому составу: 25-40% Al; 50-60% Si; не более 10% Fe; не более 0,05% S; не более 0,05% P.

В зависимости от содержания железа ферросиликоалюминий делится этими техническими условиями на 2 марки: первая марка — до 5% Fe; вторая марка — до 10% Fe. Такое резкое ограничение по железу объясняется тем, что эти технические условия устанавливались применительно к цветным сплавам, где железо является вредной примесью.

Очевидно, для целей раскисления стали вполне возможно повысить содержание железа в сплаве до 15-20%, что облегчит технологию получения этого сплава.

В состав ферросиликоалюминия входят кремний и алюминий, являющиеся сильными раскислителями, что определяет эффективное использование этого сплава в черной металлургии. Этот комплексный раскислитель имеет преимущества перед обычными раскислителями (ферросилицием и алюминием), так как при его применении образуются комплексные соединения кремнезема с глиноземом, которые легко объединяются в жидком металле, образуя более крупные шлаковые частицы, легко всплывающие в шлак, что приводит к уменьшению содержания неметаллических включений в стали.

Применение ферросиликоалюминия при раскислении конвертерной и мартеновской стали широкого сортамента приводит к улучшению качества стали и увеличению усвоения раскисляющего алюминия (на 30-60%).

Кроме того ферросиликоалюминий может быть использован в качестве восстановителя при металлотермических процессах получения металлов и сплавов, заменяя смесь ферросилиция с алюминиевой крупкой.

Преимущество ферросиликоалюминия здесь проявляется в том, что он легко дробится и размалывается в порошок, тогда как размельчение чистого алюминия сопряжено с некоторыми трудностями.

Ферросиликоалюминий может быть применен и в других отраслях промышленности при термитной сварке, для засыпки головной части слитков стали и т.д. [50].

5.7 Расчет экономической эффективности

Расчет экономической эффективности применения в производстве стальной продукции ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и ФС 65А10 ПФ ТОО "Кастинг" представлен в таблице 11.

Таблица 11 - Расчет экономической эффективности применения в производстве стальной продукции ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и ФС 65А10 ПФ ТОО "Кастинг"

	Использовалось при производстве сталей			Предлагается использование по результатам испытаний		
	Цена за единицу измерения на январь 2014г. (ПИА), тг без НДС	Среднегодовой фактический расход 2013 кг/тн	Сумма тг, без НДС на тонну	ФСА марок ФС55А10 и ФС 65А10 ПФ ТОО "KSPSteel" (предлагаемый)		
				По цене ферросилиция ФС 65-4	Фактически расход по карте опыта ФСА, кг/тн	Сумма тг, без НДС на тонну
70 Г	215447,1	3,2	689,4	215447,1	1,6	344,7
35 ГС	215447,1	9,8	2111,4	215447,1	1,2	258,5
Ш с хромом	215447,1	3,3	711,0	215447,1	1,6	344,7

Продолжение таблицы 11

Предлагается использование по результатам испытаний			Отклонения в кг/т	Отклонения в тенге		
ФС марки ФС 65-4 (применяемый)		Сумма тг, без НДС на тонну		Перерасход, экономия на 1 т	За счет разницы цен	За счет разницы норм
Фактически расход по карте опыта ФС, кг/тн	Сумма тг, без НДС на тонну					
1,3	280,1	624,8	-0,3	-64,6	0,0	-64,6
8,3	1788,2	2046,7	-0,3	-64,6	0,0	-64,6
1,4	301,6	646,3	-0,3	-64,6	0,0	-64,6

Выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления:

- использование ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и марки ФС6510 в производство стали приведет к уменьшению себестоимости за счет снижения расхода ферросилиция;

- полная замена ферросилиция на ферросиликоалюминий возможна при разливке металла на МНЛЗ "под уровень", т.е. с 100% защитой струи металла погруженными стакан-дозаторами;
- использование ферросиликоалюминия при производстве стали 35ГС рекомендуется при стабильном производстве и обеспечении требуемыми материалами;
- применение ферросиликоалюминия привело к снижению содержания неметаллических включений в стали, и как следствие к улучшению качества стали и снижению возможности образования брака при прокате.

6 Охрана окружающей среды

Проблема охраны природы и рационального использования природных ресурсов отнесена к числу важнейших государственных задач.

Основные задачи по охране природы, стоящие перед металлургией, сводятся к следующим:

Постоянный контроль за состоянием окружающей среды и источником загрязнения с помощью новейших научно-технических средств с целью принятия необходимых мер для охраны природы.

Уменьшение вредного воздействия отходов металлургического производства на окружающую среду. С этой целью необходимо разрабатывать и внедрять технологические процессы, в том числе и процессы получения ферросплавов, обеспечивающие уменьшение отходов, а также их использование в собственно металлургическом (ферросплавном), смежных производствах и отраслях промышленности [51].

Использование в металлургической технологии воды (для охлаждения элементов конструкции электропечей, грануляции ферросплавов, шлаков и др.) по замкнутому циклу, для чего разрабатывать и внедрять в производство высокоэффективные очистные сооружения.

Разработка новых методов и средств борьбы с вредными выбросами веществ в атмосферу, воздействием электрических и магнитных полей и излучений, вибрациями и шумами.

Предохранение плодородных почв от загрязнения промышленными отходами (шлаками, стоками грязных вод и др.).

Осуществление мер по комплексному и рациональному использованию минерально-сырьевых и водных ресурсов.

Совершенствование прогнозирования влияния металлургического производства на окружающую среду, учет его возможных социальных и экономических последствий при разработке проектов металлургических агрегатов и предприятий, и, в частности, ферросплавных печей, цехов и заводов [52].

При современных масштабах металлургического производства, высоких темпах развития всех отраслей промышленности проблема охраны природы от вредных выбросов приобрела глобальный характер.

При нынешнем уровне техники и технологии выбросы предприятий черной металлургии составляют 7,52% всех загрязнений в мировом масштабе. Интегрированный металлургический завод производительностью 10 млн. т стали в год выбрасывает в год 220 тыс. т пыли, 50 тыс. т соединений серы, 250 тыс. т оксида углерода и других веществ.

Вредное действие выбросов металлургического и других производств проявляется как в непосредственном влиянии на человека, вызывая всевозможные профессиональные заболевания, так и в загрязнении водоемов, поражении лесных массивов, в конечном счете оказывая влияние на климат планеты. Установлено, что вследствие высоких темпов повышения концентрации CO_2 г в атмосфере, которая за 100 последних лет увеличилась на 10% создает опасность повышения температуры планеты в среднем на 2 -2,5°C, и как полагают специалисты, может оказать существенное влияние на водный режим планеты и вызвать другие необратимые последствия. Диоксид углерода

задерживает инфракрасное излучение, поэтому увеличение его содержания в земной атмосфере развивает так называемый «тепличный» или «парниковый» эффект, вследствие чего температура на нашей планете должна повышаться.

В ряде технически развитых стран также приняты соответствующие законы в области охраны окружающей среды.

Нормативными документами регламентируются допустимые концентрации вредных веществ в выбрасываемых в атмосферу газах, сточных водах и пр. Ограничены концентрации 50 твердых и 120 газообразных веществ. Предельно допустимые концентрации некоторых веществ по данным зарубежных специалистов приведены в таблице 12.

Таблица 12 - Допустимое содержание некоторых вредных веществ в воздухе, мг/м³

Вещество	Ближайший период времени	Для перспективного периода времени
Пыль с крупностью частиц:		
- 10 мкм	0,4	0,2
- 10 мкм	0,2	0,1
Хлор (Cl ₂)	0,3	0,1
Фторид кальция (CaF ₂)	0,3	0,1
Оксид углерода (CO)	30	10
Диоксид серы (SO ₂)	0,4	0,14
Сероводород (H ₂ S)	0,01	0,005
Диоксид азота (NO ₂)	0,3	0,1
Монооксид азота (NO)	0,6	0,2

Характеристика вредных выбросов в ферросплавном производстве. Основными вредными выбросами при получении ферросплавов являются колошниковые газы, шлаки и пылевидные образования. Количество и состав этих побочных продуктов электроферросплавного производства зависят от технологии выплавки ферросплавов, конструкции ферросплавных печей, а также от эффективности работы очистных сооружений. Наибольшее количество пылегазовыделений и отвальных шлаков приходится на процессы, связанные с использованием углерода как восстановителя, т. е. на углеродотермические процессы [53].

Колошниковые газы всех ферросплавных печей, производящих кремнистые, марганцевые и хромистые ферросплавы углеродовосстановительным методом, содержат 70—90% CO₂. Химический состав пылевидных выделений при выплавке различных ферросплавов зависит прежде всего от вида сплава. При получении ферросилиция основным компонентом в шихте является кремнезем. При выплавке силикокальция наряду с SiO₂ в пыли много оксида кальция (до 20 - 24%). Для группы марганцевых

ферросплавов характерно наличие в пыли оксидов марганца, хромистых ферросплавов — оксидов хрома и т. д. [54].

Выплавка ряда марок высококремнистых ферросплавов и прежде всего ферросилиция ФС90 и ФС75 пока не освоена в закрытых печах, поэтому на газоочистку приходится подавать не технологический колошниковый (подсводовый) газ, а газовоздушную смесь, поступающую в вытяжную шахту. Выплавка ферросплавов в закрытых печах позволяет резко сократить фактическое количество поступающих на очистку газов и уменьшает выбросы пыли с газами. Трудность решения задачи глубокой очистки технологических газов объясняется мелкодисперсностью пыли, содержащейся в газе.

Для очистки технологических газов в ферросплавном производстве применяют мокрую и сухую схемы газоочистки, которые имеют как преимущества, так и недостатки.

Преимущества мокрой газоочистки состоят в том, что колошниковый газ в контакте с водой сразу же охлаждается. Однако на последующих стадиях требуется очистка воды от твердых частиц и растворенных веществ, чтобы обеспечить работу газоочистки с оборотным водным циклом. Одним из наиболее распространенных вариантов сухой очистки газов является установка с тканевыми фильтрами. Основной недостаток этих установок — низкая стойкость ткани и высокие расходы, связанные с эксплуатацией. При получении ряда других ферросплавов (ферровольфрама, ферромolibдена и др.) сбор и очистка пылегазовыделений производится не только с целью охраны окружающей среды, но главным образом для улавливания дорогих и дефицитных оксидов вольфрама, молибдена и других ценных металлов.

Создание и эксплуатация комплекса очистных сооружений с целью охраны окружающей среды сопряжено с большими капиталовложениями.

Потребление технологической воды заводами черной металлургии ежегодно увеличивается на 2 - 3%.

Доля различных производств в потреблении воды и образовании сточных вод следующая: доменное — 25%, сталеплавильное — 20% и прокатное — до 40%.

Важной природоохранной задачей является уменьшение количества шлаков ферросплавного производства, а при невозможности их использования — правильная организация их складирования. Задача организации шлакоотвалов должна быть решена с учетом необходимости уменьшения затрат на погрузочно-транспортные расходы, а также характера и масштабов ущерба, который могут принести шлакоотвалы, особенно при складировании легко рассыпающихся шлаков силикотермического производства; марганца и феррохрома [55].

Для оптимального решения этих задач необходимо:

- 1) определить состав и свойства отходов, а прежде всего их токсичность;
- 2) установить степень их проникновения в окружающую среду, характер грунта и наличие грунтовых вод, а также степень опасности загрязнения воздушного бассейна, например пылью, образующейся при разложении

высокоосновных ($\text{CaO/SiO}_2 = 1,5 - 2,2$) шлаков металлического марганца и силикотермического феррохрома;

3) укладывать отвалы уплотненными слоями с образованием террас с таким расчетом, чтобы в дальнейшем можно было разрабатывать эти шлаки;

4) хранить отходы различных ферросплавов отдельно по их видам для последующей утилизации, когда она окажется необходимой и возможной;

5) изучать возможность такой утилизации, для чего следует вести научные поиски в области использования различных отходов в ферросплавном производстве или в смежных отраслях промышленности [56].

Ферросплавные дуговые печи, единичная мощность которых достигла 75 МВ·А — мощный источник шума, сильных электромагнитных полей, которые отрицательно воздействуют на обслуживающий персонал. По данным американского института чугуна и стали 34% работников металлургических заводов ежедневно подвергаются воздействию шума сильнее 90 дБ, а 65% — сильнее 85 дБ. Использование экранов из листовой стали, звукопоглощающих материалов, упругих веществ, амортизирующих вибрацию, и других средств значительно снижает уровень шума, однако требует больших финансовых средств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большой спрос на ферросиликоалюминий объясняется тем, что он полностью превосходит по эффективности традиционные сплавы -

ферросилиций и алюмокремниевые сплавы - при производстве рядовых марок стали на металлургических комбинатах. Универсальный раскислитель в процессе выплавки легированной стали заменяет все остальные ингредиенты. При выплавке комплексного сплава ФСА опробованы различные виды шихтовых материалов. Главное преимущество ФСА заключается в том, что при электротермическом получении этого сплава единица массы алюминия обходится дешевле, чем при производстве электролитического алюминия. Кроме того, раскислительная способность кремния и алюминия значительно повышается при их совместном действии. Содержание оксида железа не должно превышать 3,6 %. В ходе восстановительного процесса в электропечи железо восстанавливается практически полностью и увеличение его доли в шихте более 6 % сопровождается значительным снижением содержания кремния и алюминия в сплаве.

Выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления:

- использование ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и марки ФС6510 в производство стали приведет к уменьшению себестоимости за счет снижения расхода ферросилиция;

- использование ферросиликоалюминия при производстве стали 35ГС рекомендуется при стабильном производстве и обеспечении требуемыми материалами;

- применение ферросиликоалюминия привело к снижению содержания неметаллических включений в стали, и как следствие к улучшению качества стали и снижению возможности образования брака при прокате.

- рассмотрены основные сферы использования сплавов ФСА. Определены равновесные температуры восстановления углеродом оксидов металлов, входящих в состав ферросиликоалюминия, °С: 1544 - SiO_2 , 2095 - Al_2O_3 , 950 - Fe_2O_3 .

- показан расчет экономической эффективности применения в производстве стальной продукции ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и ФС65А10 ПФ ТОО "KSPSteel".

- расчет прибыли металлургического производства показал, что лучшее качество стали достигается при использовании на установке "печь-ковш" в качестве раскислителя сплава ФСА в количестве 20-30 кг на одну плавку после отбора первой пробы на шлак. Экономический эффект основан на том факте, что за счет лучшей усваиваемости сплава ФСА расход кремния в сравнении со сплавом ФС65-4 сокращается на 20-25 %, а расход алюминия на 50-70 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Производство высоколегированных сталей. - М.: Металлургия, 2002 г.-784 с.

2. Бабич В. К., Лукашин Н. Д., Морозов А. С., Поляк И. П., Соболевский А. Л., Тараканов Ю. В., Шевякова Л. Г. Основы металлургического производства. - М.: Металлургия, 2001 г. - 281 с.
3. Некрасов В.М. Развитие металлургии на современном этапе.-М.: Металлургия, 2003 г. - 22 с.
4. Капленко Ю.П., Колосов В.А., Харин С.А. Себестоимость железной руды: проблема снижения как определяющий фактор конкурентоспособности. - М.:Металлургическая и горнорудная промышленность, 2003 г. - 101 с.
5. Лаптева А. В поисках сырья. - М.: Национальная металлургия, 2003 г. - 251 с.
6. Сторчак С.А. и др. Комплексный подход к предотвращению техногенных аварий и утилизации отходов в горнодобывающих регионах. - М: Металлургическая и горнорудная промышленность, 2003 г. -116 с.
7. Рысс М.А. Производство ферросплавов. М.: Металлургия, 1985 г. - 344 с.
8. Рябчиков И.В., Мизин В.Г., Лякишев Н.П., Дубровин А.С., Ферросплавы с редко - и щелочноземельными металлами. - М: Металлургия, 1999 г. - 272 с.
9. Гасик М.И., Зубов В.Л. Электрометаллургия ферросилиция. Д.: -Системные технологии, 2002 г. - 704 с.
10. Щедровицкий Я.С. Высокремнистые ферросплавы. Производство кремния и ферросилиция. - М.: Металлургия, 2001 г. - 256 с.
11. Жучков В.И., Лукин С.В., Технология ферросплавов со щелочноземельными металлами.- М.: Металлургия, 2002 г. - 104 с.
12. Щедровицкий Я.С. Сложные кремнистые сплавы. - М.: Металлургия, 1986 г.- 175 с.
13. Степанянц С.Л. Автоматизация технологических процессов ферросплавного производства. - М.:Металлургия, 1982 г. - 136 с.
14. Еднерал Ф.И. Электрометаллургия стали и ферросплавов. -М.:Металлургия, 1977 г. - 488 с.
15. Куберский С. В., Алчевск. Электрометаллургия стали и ферросплавов. - М.: Металлургия, 2006 г. - 102с.
16. Атаманюк В.Г., Ширшев Л.Г., Акимов Н. И.Черная металлургия: Учебник для вузов под ред. Д. И. Михайлика. - М.: Высшая школа, 2004 г. – 207 с.
17. Хван Т.А. Хван П.А.Ферросплавы. Серия «Высшее образование». Ростов н/д.: «Феникс», 2005 г. – 416 с.
18. Абдрахманов С.К. Черная металлургия. Информационно-справочное пособие. Алматы, 2006 г. – 276 с.
19. Васильев П.П.Ферросилиций: Учебное пособие для вузов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003 г.-188с.
20. Калыгин В.Г.Химия. Курс лекций. - М., Химия, 2006 г. - 520 с.
21. Акимов В.А.Химия и металлургия. - М.: ФИД «Деловой экспресс», 2001 г. – 402 с.

22. Мусина У.Ш. Теоретические основы неорганической химии. Учебное пособие. – Алматы: Каз НТУ, 2000 г. - 221 с.
23. Строганова М.Н. Производство сталей. - М.: Металлургия, 1997 г. 164 с.
24. Алексеев Ю.В. Металлы в химии. - Л.: Агропромиздат, 1987 г. – 142 с.
25. Краснокутская О.Н., Кузьмич М.А., Выродова Л.П. Кремний в стали. - М.: Агрохимия, 1990 г. 128-140 с.
26. Пронина Н.Б. Производство ферросилиция. - М.: Изд-во МСХА, 2000 г. – 312 с.
27. Авцын П.А., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. Классификация сталей. - М.: Химия, 1991 г. – 496 с.
28. Щebroвицкий Я. С. Высокремнистые ферросплавы. - М.: Металлургиздат, 1961 г.- 303 с.
29. Щebroвицкий Я. С. Производство ферросплавов в закрытых печах. - М.: Металлургия, 1975 г, - 312 с.
30. Щebroвицкий Я. С. Сложные кремнистые ферросплавы. - М.: Металлургия, 1966 г. - 176 с.
31. Цветков Ю В., Панфилов С. А. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления. - М.: Наука, 1980 г. - 360 с.
32. Титан В. А., Гармата. А. Н. Петрунько, Н.В., Галицкий и др. - М.: Металлургия, 1983 г.. - 559 с.
33. Федоров В. Б., Шоршов М. Х., Хакимов Д. К. Углерод и его взаимодействие с металлами. - М.: Металлургия, 1978 г.- 208 с.
34. Утков В. А. Высокоосновный агломерат. - М.: Металлургия, 1977 г.-156 с.
35. Жуховицкий А. А., Белашенко Д. К., Бокштейн Б. С. и др. Физико-химические основы металлургических процессов. - М.: Металлургия, 1973 г. - 392 с.
36. Ростовцева С. Т., Гасик М. И. Физико-химические основы металлургии марганца. - М.: Наука, 1977 г. - 262 с.
37. Мизин В. Г., Лякишев Н. П., Дубровин А. С. Металлы. - М.: Металлургия, 1983 г. - 272 с.
38. Фиалков А. С. Углеграфитовые материалы. - М.: Энергия, 1979 г. - 320 с.
39. Ершов В. А., Данцис Я. Б., Жилое Г. М. Теоретические основы химической электротермии. - М.: Химия, 1978 г. - 184 с.
40. Ершов В. А., Данцис Я. Б., Реутовин Л. М. Производство карбида кальция. - Л.: Химия, 1978 г. - 184 с.
41. Казачков И. П. Легирование стали. Киев: Техника, 1982 г. - 120 с.
42. Рыжонков Д.И. Теория металлургических процессов. - М.: Металлургия, 1989 - 322 с.

43. Вергун А.С., Двоскин Б.В., Шевченко А.Ф., Лындя П.С. К вопросу о выборе рациональной схемы производства качественной стали. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2006. №3. С. 21-23.
44. Сидельковский М.П. Влияние редкоземельных элементов и бора на нержавеющие, жаропрочные и жаростойкие стали // В сб.: "Редкоземельные металлы и сплавы". - М.: Наука, 1971.-255 с.
45. Касимов Н.С., Перельман А.И., Евсеев А.В. и др. Металлургия тугоплавких и редких металлов. – М., 1995. – 333 с.
46. Буренков Э.К., Гинзбург Л.Н., Грибанова Н.К. и др. Взаимодействие окислов металлов с углеродом. – М.: «Прима-Пресс», 1997. – 72 с.
47. Ковда В.А. Проблемы защиты почвенного покрова и биосферы планеты. – Пушино, 1989.
48. Большаков В.А., Краснова Н.М., Борисочкина Т.И., Сорокин С.Е., Граковский В.Г. Теоретические основы химической электрохимии. – М., 1993. – 90 с.
49. Владимиров В.С., Карпухин И.А., Мойзис С.Е. Структура жидких металлов и сплавов. – 2002. - №33. - С.13-23
50. Торопов Н.А., Сиражиддинов Н.А. Свойства расплавов железа. – М.-Л.: Наука, 1965. С. 193-210.
51. Будников П.П. Металлургические расплавы и их сплавы. – М.: Металлургия, 1972. – 553 с.
52. Карлиткина А.К., Ларин А.П., Лосев С.А., Верниковский. Пылегазовые выбросы предприятий черной металлургии. – М.: Металлургия, 1981.- 320 с.
53. Рыбакова Л. М., Куксёнова Л.И., Босов С.В. Металлургия сплавов. - М.: Металлургия, 1973 г. - 296с.
54. Кашеев И.Д., Стрелов К.К., Мамыкин П.С. Химическая технология неорганических веществ. - М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 752 с.
55. Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Металлургия железа.- М.: Машиностроение-1, 2007 г. – 471 с.
56. Бережной А.С. Многокомпонентные системы окислов. - М.: Химия, 1989 г. - 243 с.

1. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Производство высоколегированных сталей. - М.: Металлургия, 2002 г.-784 с.
2. Бабич В. К., Лукашин Н. Д., Морозов А. С., Поляк И. П., Соболевский А. Л., Тараканов Ю. В., Шевякова Л. Г. Основы металлургического производства. - М.: Металлургия, 2001 г. - 281 с.
3. Некрасов В.М. Развитие металлургии на современном этапе.-М.: Металлургия, 2003 г. - 22 с.
4. Капленко Ю.П., Колосов В.А., Харин С.А. Себестоимость железной руды: проблема снижения как определяющий фактор конкурентоспособности. - М.:Металлургическая и горнорудная промышленность, 2003 г. - 101 с.
5. Лаптева А. В поисках сырья. - М.: Национальная металлургия, 2003 г. - 251 с.
6. Сторчак С.А. и др. Комплексный подход к предотвращению техногенных аварий и утилизации отходов в горнодобывающих регионах. - М: Металлургическая и горнорудная промышленность, 2003 г. -116 с.
7. Рысс М.А. Производство ферросплавов. М.: Металлургия, 1985 г. - 344 с.
8. Рябчиков И.В., Мизин В.Г., Лякишев Н.П., Дубровин А.С., Ферросплавы с редко - и щелочноземельными металлами. - М: Металлургия, 1999 г. - 272 с.
9. Гасик М.И., Зубов В.Л. Электрометаллургия ферросилиция. Д.: -Системные технологии, 2002 г. - 704 с.
10. Щедровицкий Я.С. Высококремнистые ферросплавы. Производство кремния и ферросилиция. - М.: Металлургия, 2001 г. - 256 с.
11. Жучков В.И., Лукин С.В., Технология ферросплавов со щелочноземельными металлами.- М.: Металлургия, 2002 г. - 104 с.
12. Щедровицкий Я.С. Сложные кремнистые сплавы. - М.: Металлургия, 1986 г.- 175 с.
13. Степанянц С.Л. Автоматизация технологических процессов ферросплавного производства. - М.:Металлургия, 1982 г. - 136 с.
14. Еднерал Ф.И. Электрометаллургия стали и ферросплавов. -М.:Металлургия, 1977 г. - 488 с.
15. Куберский С. В., Алчевск. Электрометаллургия стали и ферросплавов. - М.: Металлургия, 2006 г. - 102с.
16. Атаманюк В.Г., Ширшев Л.Г., Акимов Н. И.Черная металлургия: Учебник для вузов под ред. Д. И. Михайлика. - М.: Высшая школа, 2004 г. – 207 с.
17. Хван Т.А. Хван П.А.Ферросплавы. Серия «Высшее образование». Ростов н/д.: «Феникс», 2005 г. – 416 с.
18. Абдрахманов С.К. Черная металлургия. Информационно-справочное пособие. Алматы, 2006 г. – 276 с.
19. Васильев П.П.Ферросилиций: Учебное пособие для вузов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003 г.-188с.
20. Калыгин В.Г.Химия. Курс лекций. - М., Химия, 2006 г. - 520 с.

21. Акимов В.А. Химия и металлургия. - М.: ФИД «Деловой экспресс», 2001 г. – 402 с.
22. Мусина У.Ш. Теоретические основы неорганической химии. Учебное пособие. – Алматы: Каз НТУ, 2000 г. - 221 с.
23. Строганова М.Н. Производство сталей. - М.: Металлургия, 1997 г. 164 с.
24. Алексеев Ю.В. Металлы в химии. - Л.: Агропромиздат, 1987 г. – 142 с.
25. Краснокутская О.Н., Кузьмич М.А., Выродова Л.П. Кремний в сталях. - М.: Агрохимия, 1990 г. 128-140 с.
26. Пронина Н.Б. Производство ферросилиция. - М.: Изд-во МСХА, 2000 г. – 312 с.
27. Авцын П.А., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. Классификация сталей. - М.: Химия, 1991 г. – 496 с.
28. Щебровицкий Я. С. Высокремнистые ферросплавы. - М.: Металлургиздат, 1961 г.- 303 с.
29. Щебровицкий Я. С. Производство ферросплавов в закрытых печах. - М.: Металлургия, 1975 г, - 312 с.
30. Щебровицкий Я. С. Сложные кремнистые ферросплавы. - М.: Металлургия, 1966 г. - 176 с.
31. Цветков Ю. В., Панфилов С. А. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления. - М.: Наука, 1980 г. - 360 с.
32. Титан В. А., Гармата. А. Н. Петрунько, Н.В., Галицкий и др. - М.: Металлургия, 1983 г.. - 559 с.
33. Федоров В. Б., Шоршов М. Х., Хакимов Д. К. Углерод и его взаимодействие с металлами. - М.: Металлургия, 1978 г.- 208 с.
34. Утков В. А. Высокоосновный агломерат. - М.: Металлургия, 1977 г.-156 с.
35. Жуховицкий А. А., Белашенко Д. К., Бокштейн Б. С. и др. Физико-химические основы металлургических процессов. - М.: Металлургия, 1973 г. - 392 с.
36. Ростовцева С. Т., Гасик М. И. Физико-химические основы металлургии марганца. - М.: Наука, 1977 г. - 262 с.
37. Мизин В. Г., Лякишев Н. П., Дубровин А. С. Металлы. - М.: Металлургия, 1983 г. - 272 с.
38. Фиалков А. С. Углеграфитовые материалы. - М.: Энергия, 1979 г. - 320 с.
39. Ершов В. А., Данцис Я. Б., Жилое Г. М. Теоретические основы химической электротермии. - М.: Химия, 1978 г. - 184 с.
40. Ершов В. А., Данцис Я. Б., Реутовин Л. М. Производство карбида кальция. - Л.: Химия, 1978 г. - 184 с.
41. Казачков И. П. Легирование стали. Киев: Техника, 1982 г. - 120 с.

На правах рукописи

Аубакирова Макпал Буркутовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФЕРРОСИЛИКОАЛЮМИНИЯ НА
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ ПРИ ВНЕПЕЧНЫХ
СПОСОБАХ ПОЛУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПФ ТОО "КАСТИНГ"**

**Автореферат
магистерской диссертации**

Павлодар, 2014

Работа выполнена в Инновационном Евразийском университете

Научный руководитель:

доктор химических наук
А.К. Свидерский

Официальный оппонент

доктор химических наук
К.Б. Мурзагулова

Защита состоится « » _____ 2014 года в _____
часов в аудитории № _____

С магистерской диссертацией можно ознакомиться в научной
библиотеке Инновационного Евразийского университета

РЕЗЮМЕ

В работе доказывается потребность и возможность использования ферросиликоалюминия в качестве заменителя традиционного раскислителя - ферросилиция, так как ферросиликоалюминий приведет к уменьшению себестоимости за счет снижения расхода ферросилиция, что доказывается работе в ходе проведенного эксперимента. Особо следует подчеркнуть, что в первую очередь ферросиликоалюминий будет направляться на обеспечение собственных нужд предприятия ПФ ТОО "KSP Steel". Данный сплав планируют использовать при производстве основной продукции ПФ ТОО «KSP Steel»: стальной заготовки, нефтепроводных и насосно-компрессорных труб и др.

Ферросиликоалюминий - сплав кремния, алюминия и железа (три самых распространенных после кислорода элемента в земной коре), который при выплавке стали может заменять раскислители, давно ставшие традиционными - алюминий и ферросилиций. Одно из преимуществ ферросиликоалюминия - более низкая стоимость, чем у традиционных раскислителей, обусловленная тем, что при электротермической плавке ферросиликоалюминия довольно большое количество алюминия восстанавливается попутно с кремнием и железом, и при этом затраты на электроэнергию для восстановления алюминия вдвое меньше, чем при электролизе.

В работе доказывается необходимость и допустимость применения ферросиликоалюминия, который повышает качество металла и значительно снижает его себестоимость.

Данная работа демонстрирует уникальность и позволит серьезно улучшить качество выпускаемой продукции черной металлургии.

АНДАТПА

Жұмыста ферросиликоалюминийді дәстүрлі ашытқының орнына пайдалану қажеттілігі мен мүмкіндігі дәлелденді, өйткені ферросиликоалюминий ферросилицийдің шығынын төмендету есебінен өз құнын азаутуға әкеледі, бұл жұмыс барысында жасалған тәжірибемен дәлелденеді. Ең алдымен ферросиликоалюминий "KSP Steel" ЖШС ПФ кәсіпорнының жеке қажеттілігі үшін бағытталатын болады. Бұл қорытпа "KSP Steel" ЖШС ПФ негізгі өнімін өндіруде пайдалану жоспарлануда: болат дайындама, мұнай өткізгіш және сорғы-компрессорлық құбырлар және т.б.

Ферросиликоалюминий – кремний, алюминий және темір (жер бедеріндегі оттегі элементінен кейінгі кең тараған үш элемент) қорытпасы, одан болатты балқытқаннан кейін бұрыннан бері дәстүрлі болып келе жатқан алюминий және ферросилиций ашытқыны алмастыра алады. Бірақ ферросиликоалюминийдің басты артықшылығы – дәстүрлі ашытқымен салыстырғанда төмен құны, ол ферросиликоалюминийді электр термиялық балқытқан кезде алюминий кремний және темірмен бірге көп көлемде қайта қалыпқа келетінімен түсіндіріледі, және сонымен қатар алюминийді қалыпқа келтіруге жұмсалатын шығын электролизбен салыстырғанда екі есе аз болады.

Жұмыста металлдың сапасын арттыратын және оның өзіндік құнын едәуір төмендететін ферросиликоалюминийді пайдалану қажеттілігі мен мүмкіндігі дәлелденеді.

Осы жұмыс әмбебаптылықты көрсетеді және шығарылатын қара металлургия өнімінің сапасын жақсартуға мүмкіндік береді.

SUMMARY

In this paper the need and ability to use aluminum ferrosilicon as a substitute for traditional deoxidizer - ferrosilicon as aluminum ferrosilicon will reduce the cost by reducing the consumption of ferrosilicon, which is proved by the work during the experiment. It should be emphasized that in the first place aluminum ferrosilicon will be channeled to their own business needs "KSP Steel" LLP. This alloy is used in the production plan basic production "KSP Steel" LLP steel billet oil pipeline and tubing, etc.

Aluminum ferrosilicon - silicon alloy, aluminum and iron (the three most common element after oxygen ment in the earth's crust), which in the smelting hundred whether can replace scavengers have long been traditional - aluminum and ferrosilicon. One of the advantages aluminum ferrosilicon - the lower one imost than traditional deoxidizers obus hailing the fact that when electrothermal melting aluminum ferrosilicon airly large amount of aluminum recovered simultaneously with silicon and iron, while the cost of electricity for aluminum reduction half than electrolysis.

We prove necessary and acceptable use aluminum ferrosilicon, which improves the quality of the metal and significantly reduces its cost.

This work demonstrates the uniqueness and allow seriously improve the quality of steel products.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с ростом экономики Республики Казахстан, увеличиваются темпы роста металлургической промышленности. Как известно, при производстве стали широко применяют ферросплавы, которые используются как легирующие добавки для улучшения качества металлов [1].

Производство ферросплавов неразрывно связано с общим уровнем развития металлургической промышленности, особенно с производством высококачественных легированных сталей.

В настоящее время на ПФ ТОО «KSP Steel» реализуется проект по организации ферросплавного производства по выпуску ферросиликоалюминия. Сортамент продукции может варьироваться в широких пределах, в зависимости от потребности потенциальных потребителей. Срок реализации проекта 2013 - 2014 гг.

Прогнозируемая потребность в данном продукте только у предприятий СНГ составляет до 200 тысяч тонн в год. Большой спрос на ферросиликоалюминий объясняется тем, что он полностью превосходит и заменяет традиционные сплавы — ферросилиций и алюминий — при производстве рядовых марок стали на металлургических комбинатах. По оценкам специалистов, при использовании сплава экономия на производстве стали достигает \$3 на тонну продукции.

Современный уровень развития техники требует значительного расширения сортамента и повышения качества специальных сталей, что осуществимо только при наличии в стране высокоразвитого производства ферросплавов [2].

За короткий период своего существования отечественное производство ферросплавов стало одной из передовых отраслей промышленности, полностью удовлетворяющей потребности нашей металлургии.

Дальнейшее усовершенствование технологии производства ферросплавов, а также создание новых технологических процессов возможно при условии глубокого изучения теоретических основ получения сплавов [3].

В современном индустриальном обществе сталь, благодаря широкому спектру целенаправленно регулируемых свойств, оптимальному соотношению цены и качества, хорошей способности к утилизации, остается базовым материалом стабильного развития общества. Сталь находит широкое применение во всех важнейших отраслях промышленности: строительстве высотных зданий, энергетике и экологической технике, транспорте, машино- и мостостроении, автомобилестроении и бытовой технике [4].

Сталь - это конструкционный материал, обладающий комплексом уникальных физико-технических, технологических и эксплуатационных свойств, что создает этому материалу наиболее широкую область применения. В соответствии с ускоряющимися темпами развития общества, его индустриализации, растет потребление и производство стали в мировой металлургии [5].

Вместе с тем, на мировом рынке уже длительное время сложилась ситуация, когда цены на сырье, материалы, энергоносители, рабочую силу растут быстрее, чем цены на металлопродукцию. Такая диспропорция заставляет металлургов для сохранения конкурентоспособности изыскивать новые пути совершенствования технологии, оборудования и, в целом, изменения принципов получения конечного продукта с меньшими затратами. В то же время и потребительские требования растут опережающими темпами.

В этих условиях трансформируется сама концепция производства стали.

Целью работы является исследование влияния ферросиликоалюминия на физико-химические свойства стали при внепечных способах получения в условиях ПФ ТОО "Кастинг".

В процессе плавки стали кислород ухудшает качество металла. Для избежания этого и извлечения кислорода из расплава применяют методику, называемую раскислением стали. То есть в ее расплавленную массу добавляют ферросилиций и алюминий в чушках. Технологии получения алюминия и ферросилиция являются энергоемкими и требуют больших затрат при подготовке сырья к плавке чушкового алюминия. Уникальность работы состоит в том, что Павлодарский ферросиликоалюминий значительно снижает затраты энергии и расход ферросиликоалюминия, да и сама выплавляемая сталь получается более качественной [6].

Научная новизна темы состоит в том, что данная разработка решает не только технологические задачи выплавки высококачественной стали, но и экологические, так как ферросиликоалюминий получают из экибастузского низкосортного высокосольного угля, который идет в отвалы, нанося урон окружающей среде. А теперь из четырех тонн такой "породы" выходит тонна дефицитного "казахстанского сплава".

Практическая значимость исследования состоит в опробовании опытно-промышленной партии ферросиликоалюминия марок ФС55А10 и ФС65А10 производства ПФ ТОО "KSP Steel" применяемого в качестве заменителя ферросилиция, а также материала улучшающего механические свойства стали.

В данной работе были поставлены следующие задачи:

- провести теоретический анализ использования ферросплавов в производстве стали;
- рассмотреть основные сферы использования сплавов ФСА. Определить равновесные температуры восстановления углеродом оксидов металлов, входящих в состав ферросиликоалюминия;
- провести промышленные испытания в цеховых условиях и сравнить полученные результаты;
- рассчитать экономическую эффективность применения в производстве стальной продукции ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и ФС65А10 ПФ ТОО "Кастинг";
- рассчитать прибыль металлургического производства при замене одного ферросплава на другой.

Ферросиликоалюминий

На производстве ПФ ТОО "Кастинг" была опробована опытно-промышленная партия ферросиликоалюминия марок ФС55А10 и ФС65А10 производства ПФ ТОО "KSP Steel" применяемого в качестве заменителя ферросилиция, а также материала улучшающего механические свойства производимых сталей.

Сталь - сплав железа (97,0 - 99,5%) и углерода (до 2%) с примесями марганца, кремния, серы, фосфора, кислорода, азота, водорода, а также случайных примесей (хром, никель, медь и др.)

Ферросилиций - легирующий сплав железа и кремния с минимальным содержанием кремния 80% по массе и максимальным - 95% по массе, полученный путем восстановления [7].

Ферросиликоалюминий - сплав Si, Al и Fe (три самых распространенных после кислорода элемента в земной коре), который при выплавке стали может заменять раскислители, давно ставшие традиционными - алюминий и ферросилиций. Одно из преимуществ ФСА - более низкая стоимость, чем у традиционных раскислителей, обусловленная тем, что при электротермической плавке ФСА довольно большое количество алюминия восстанавливается попутно с Si и Fe, и при этом затраты на электроэнергию для восстановления алюминия вдвое меньше, чем при электролизе. Раскислительная способность ФСА выше, чем у отдельных раскислителей - алюминия или ферросилиция. Раздельное раскисление стали кремнием и алюминием приводит к образованию оксида кремния и оксида алюминия - твердого силиката и корунда, которые малоспособны к коагуляции и затрудненно удаляются в шлак. Это приводит к загрязненности стали строчечными силикатами и корундом кристаллической остроугольной формы и соответствующему ухудшению механических свойств.

В шихту вводят дополнительно кварцит и небольшое количество стальной стружки, кроме того, железо вносится в сплав стальными кожухами непрерывных самообжигающихся электродов и инструментом при обслуживании выпускного отверстия. Исследованиями установлено, что угольные отходы хорошо выдерживают температурное воздействие в верхних горизонтах колошника печи и исходная фракция угля сохраняет первоначальную форму. Одним из вариантов процесса является восстановление оксидов кремния и алюминия углеродом кокса из агломерата боксита (или другого алюмосиликатного сырья) в присутствии стальной стружки. Вместо нее можно частично использовать ферросилиций (ФС25, ФС45 и т. д.). Более целесообразна плавка с заменой боксита и кварцита отвальными породами высокозольных углей (45 - 75% золы с 30 - 40% Al_2O_3 и 45 - 55% кремнезема при 15 - 20% твердого углерода и по 10 - 15% летучих), например Экибастузского месторождения. Тогда в качестве металлической части шихты вводят стальную стружку и ферросилиций или только стружку. Возможен и силикотермический (периодический) процесс выплавки сплава ФСА, но в таком

случае образуется шлак с высоким содержанием Al_2O_3 и высокой температурой плавления [8].

Сплав Fe—Si—Al (ФСА) является комплексным раскислителем стали и восстановителем, используемым при силикоалюминотермических процессах получения ферросплавов (ферромolibдена, феррованадия и т. д.). Для получения этого сплава используют непрерывный процесс плавки в рудовосстановительных печах мощностью 16,5—33 МВ·А. Шихту составляют из высокочерных отходов обогащения углей, например, Экибастузского месторождения. Эти отходы содержат 49-74% золы, 12-18% летучих, 3-8% влаги и 14-35% твердого углерода. В таблице 1 показаны содержание компонентов минеральной части [9].

Таблица 1 - Содержание компонентов минеральной части.

Компоненты минеральной части	%
SiO_2	62—66
Al_2O_3	30—33
CaO	0,5—1
MgO	0,2—0,8
FeO	2—4
P	0,05—0,14

При выплавке ФСА химический состав сплава целесообразно выбирать, исходя из соотношения Al:Si, необходимого для раскисления спокойной стали массового сортамента. Одним из критериев выбора состава сплава является необходимость получения сплава с большой плотностью и устойчивого против рассыпания при хранении. Соотношение Si:Al в сплаве наиболее целесообразно поддерживать в пределах (4 - 6) : (1,5 - 1) при 8 - 15% Al в сплаве. При этом суммарное содержание кремния и алюминия должно соответствовать количеству кремния в стандартном ферросилиции марок ФС45, ФС65 и ФС75, а фосфора должно быть < 0,07%. В ряде стран производится ферросиликоалюминий с 40 - 45% Si и 18 - 22% Al под названием фералсит. Алсмин имеет состав, %: 35 - 37 Si, 48 - 50 Al, 13 - 17 Fe, 0,4 O₂. Сплав симанал содержит примерно по 20% кремния, марганца и алюминия [10].

Применение ферросиликоалюминия при раскислении стали широкого сортамента привело к улучшению качества стали и увеличению усвоения алюминия (на 30—60%) [11].

Ферросиликоалюминий выпускается в виде кусков неправильной формы. В зависимости от химического состава устанавливают следующие марки ферросиликоалюминия: ФС55А10, ФС 55А15, ФС55А20, ФС45А10, ФС45А15, ФС45А20.

В ходе проведения эксперимента выплавлено и обработано сто сорок две плавки (марки стали 70Г, 35 ГС, шаровая сталь) и израсходовано 4,64 тонн материала ферросиликоалюминия (марки ФС55А10 - 2,43 тонн, марки ФС65А10 - 2,21 тонн). Выход годной продукции составил 3627 тонн.

В таблице 2 показан химический состав ферросиликоалюминия [12].

Таблица 2 - Химический состав ферросиликоалюминия

Марка	Массовая доля, %	
	Кремний	Алюминий
ФС55А10	53,5 - 57,5	7,5 - 12,5
ФС55А15	53,5 - 57,5	12,5 - 17,5
ФС55А20	53,5 - 57,5	17,5 - 22,5
ФС45А10	42,5 - 47,5	7,5 - 12,5
ФС55А15	42,5 - 47,5	12,5 - 17,5
ФС45А20	42,5 - 47,5	17,5 - 22,5

Химический состав с проб шлака отобранных в конечном периоде внепечной обработки плавов с использованием ферросиликоалюминия представлен в таблице 3.

Таблица 3 - Химический состав с проб шлака отобранных в конечном периоде внепечной обработки плавов с использованием ферросиликоалюминия

Плавки	Fe _{об}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	Основность	Σ
Среднее значение экспериментальных плавов	1,1	26,3	1,05	48,8	9,7	6,1	0,8	1,9	94,0
Среднее значение сравнительных плавов декабрь-январь 2014г.	0,9	28,1	0,7	54,1	6,9	2,7	0,7	1,9	94,3
Разница	0,3	-1,7	0,3	-5,7	2,8	3,7	0,2	-0,1	-0,3

Химический состав ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и марки ФС65А10, использованный в ПФ ТОО "Кастинг" представлен в таблице 4.

Таблица 4 - Химический состав ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и марки ФС65А10

Марка ФСА	Si, %	Al, %	P, %	S, %
ФС55А10	41,9	10,1	0,025	0,003
	44,6	10,09	0,042	0,07
	53,5 - 57,5	7,5 - 12,5	не более 0,7	не более 0,2
ФС65А10	67,5	12,2	0,042	0,005

Материал присаживался во время выпуска металла с тепловых агрегатов Дуговая сталеплавильная печь №2 (ДСП №2) и дуговая сталеплавильная печь №3 (ДСП №3) в сталеразливочный ковш в количестве 20-50 кг на плавку, а

также на агрегат ковш-печь (АКП) в составе шлаковой смеси в количестве 40 кг (на две плавки).

По ходу проведения эксперимента было определено оптимальное количество присаживаемого материала:

- для шаровой стали и стали 70Г - не более 40 кг на плавку (1,6 кг/тн годного);

- для стали 35 ГС - 20-30 кг на плавку (1 кг/тн годного).

При увеличении дозировки ферросиликоалюминия, а также при добавке его в составе шлаковой смеси на АКП, наблюдалось падение скоростей разливки на МНЛЗ (до 0,6 м/мин). В условиях разливки "открытой струей" присаживание ферросиликоалюминия избыточного количества влечет за собой зарастание канала стакан-дозатора промежуточного ковша оксидами алюминия и, следовательно, потери серийности разливки металла (снижение производства). Средний расход ферросиликоалюминия на экспериментальных плавках представлен в таблице 5.

Таблица 5 - Средний расход ферросиликоалюминия на экспериментальных плавках.

Марка выпускаемой стали	Расход FeSiAl, кг/тн	Расход FeSi, кг/тн	Общий расход, кг/тн	Фактический расход FeSi, кг/тн	Разница, кг/тн
70Г	1,6	1,3	2,9	3,2	-0,3
35ГС	1,2	8,3	9,5	9,8	-0,4
Шаровая сталь с Cr	1,6	1,4	3,0	3,3	-0,3

Во время разливки стали с ферросиликоалюминием наблюдалось повышенное образование "настылей" на стакан-дозаторах промежуточных ковшей. Химический состав ферросиликоалюминия должен соответствовать требованиям, указанным в таблице 6.

Таблица 6 - Химический состав ферросиликоалюминия

Марка	Массовая доля, %	
	Кремний	Алюминий
ФС55А10	53,5-57,5	7,5-12,5
ФС55А15	53,5-57,5	12,5-17,5
ФС55А20	53,5-57,5	17,5-22,5
ФС45А10	42,5-47,5	7,5-12,5
ФС55А15	42,5-47,5	12,5-17,5

Содержание серы в ферросиликоалюминии всех марок должно быть не более 0,02, фосфора - не более 0,07 (массовая доля, %) [13].

Применяемый "универсальный" раскислитель (алюминий + кремний) за счет комплексных соединений кремнезема с глиноземом, которые легко объединяются в жидком металле, образует более крупные шлаковые частицы, легко всплывающие в шлак и как следствие обеспечивающие чистоту стали.

Согласно извещений анализа макроструктуры поперечного темплета средний бал по точечной неоднородности на десяти плавках составил 1,55 единиц, при сравнении с декабрем 2013г. средний бал - 2 единицы, таким образом снижение на 22,5%.

Сырые материалы для выплавки ферросиликоалюминия

В качестве исходного сырья для получения ферросиликоалюминия можно использовать аллиты, бедные бокситы с высоким содержанием кремнезема, каолины и, наконец, золу, полученную от горения бедных каменных углей и горючих сланцев [14].

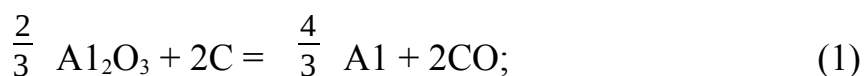
При выборе глиноземсодержащего сырья для выплавки ферросиликоалюминия необходимо обращать особое внимание на содержание фосфора в этих материалах. При получении ферросиликоалюминия фосфор почти полностью переходит в сплав, делая его малопригодным для раскисления стали и металлотермического восстановления.

Глиноземсодержащее сырье перед плавкой целесообразно просушивать и окучивать путем брикетирования или агломерации.

В качестве восстановителя при получении ферросиликоалюминия обычно используют древесный уголь [15].

Термодинамические основы получения ферросиликоалюминия

Процесс получения ферросиликоалюминия характеризуется следующими основными реакциями [1-4]:



$$\Delta F^\circ = 204100 - 86,20 \text{ T}; \quad (2)$$



$$\Delta F^\circ = 151865 - 83,73 \text{ T}. \quad (4)$$

Восстановленные алюминий и кремний образуют сплав, который вследствие высокой температуры процесса находится в сильно перегретом состоянии.

Теоретическая температура начала восстановления глинозема углеродом, при которой $P_{\text{CO}}=1$ ат, составляет 2368°K (2095°C) [17].

Приведенные данные показывают, что реакция восстановления глинозема может протекать при более высокой температуре, чем реакция восстановления кремнезема, осуществление которой возможно при температурах порядка 1540°C.

При получении ферросиликоалюминия, когда имеет место совместное восстановление окислов алюминия и кремния, создаются более благоприятные условия для осуществления этих реакций в связи с тем, что восстановленный алюминий растворяется в кремнии [3].

Константа равновесия реакции (5), выраженная через парциальное давление окиси углерода, имеет следующий вид:

$$K = P_{CO}^2 \quad (5)$$

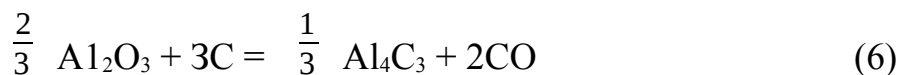
Пользуясь таблицей 7, определяем значения P_{CO}^2 при высоких температурах.

Таблица 7 - Термодинамические величины реакции восстановления глинозема

°К	ΔF°	$\lg K$	$\lg P_{CO}$	P_{CO}
1800	48940	- 5,9442	- 2,9721	$1,066 \cdot 10^{-3}$
1900	40320	- 4,6395	- 2,3197	$4,790 \cdot 10^{-3}$
2000	31700	- 3,4652	- 1,7326	$1,851 \cdot 10^{-2}$
2100	23080	- 2,4028	- 1,2014	$6,289 \cdot 10^{-2}$
2200	14460	- ,4370	- 0,7185	$1,912 \cdot 10^{-2}$
2300	5840	- 0,5551	- 0,2775	$5,278 \cdot 10^{-2}$
2400	- 2780	0,2532	- 0,1266	1,339

Температура процесса восстановления в этом случае понижается, однако она остается настолько высокой, что для нормального ведения плавки требуется очень горячий ход печи [19].

При восстановлении чистого глинозема углеродом может иметь место реакция [6]:



Уравнение свободной энергии которой в области высоких температур имеет следующий вид:

$$\Delta F^\circ = 192200 - 76,83 T. \quad (7)$$

Таким образом, термодинамическая характеристика этой реакции близка к данным реакции восстановления глинозема с образованием металлического алюминия. Процесс карбидообразования облегчается тем, что Al_4C_3 растворим в глиноземе и алюминии [20].

Однако, при нормальном ходе плавки ферросиликоалюминия, реакция образования карбида не имеет места, так как ее протеканию препятствует наличие кремния, железа и кремнезема.

В случае нарушения нормального хода процесса при резком увеличении избытка восстановителя и снижении содержания кремнезема в шихте реакция образования карбида алюминия может получить некоторое развитие [21].

Технология получения ферросиликоалюминия

Процесс получения ферросиликоалюминия может быть осуществлен в мощных шахтных электропечах, применяемых для получения ферросплавов.

Технология процесса весьма близка к технологии получения богатого ферросилиция [22].

Плавка ведется при горячем ходе печи с непрерывной загрузкой шихты при закрытом колошнике. Готовый сплав выпускается периодически по мере накопления его в печи. При нормальном ходе процесс идет практически без образования шлака.

Расчет шихты для получения силикоалюминия может быть произведен тем же методом, что и для высокопроцентного ферросилиция.

Глиноземсодержащее сырье выбирается в зависимости от заданного состава сплава по соотношению алюминия, кремния и железа.

В случае необходимости увеличения в сплаве содержания кремния или железа в шихту вводят соответственно кварцит или железную стружку. Кроме того, кварцит вводят в шихту в случае зарастания печи благодаря образованию карбидов алюминия и кремния [23].

Технология получения 30%-ного ферросиликоалюминия из каолинов, разработанная в ВАМИ В. Н. Веригиным, была использована Днепропетровским алюминиевым заводом для получения силумина. Шихта состояла из каолина, кварцевого песка и древесного угля.

Плавка велась непрерывным способом с периодическим выпуском сплава.

Ферросиликоалюминий содержал в среднем 25% Al; 74% Si; и 1 % Fe. На 1 т сплава расходовалось продуктов (таблица 8):

Таблица 8 - Расход продуктов на 1 т. сплава

Продукт	Количество
Каолин, т	1,8
Кварцевый песок, т	0,9
Древесный уголь, т	1,3
Электроды, т	0,24
Электроэнергия, квт·ч	10000 - 15000

Опыты по получению ферросиликоалюминия из золы минерального топлива впервые проведены В. П. Елютиным и Р. Н. Григорашем [24].

Основное преимущество золы перед другими содержащими глинозем материалами заключается в том, что в ней находится значительное количество углерода, который может быть использован в качестве восстановителя, благодаря чему снижается количество древесного угля в шихте.

Плавку вели в дуговой электрической печи мощностью 60 кВА периодическим процессом при 1700—1750°C.

Шихта состояла из золы челябинских углей и соответствующего количества восстановителя.

Полученный сплав содержал 18 - 22% Al; 40 - 47% Si; до 5% C и 0,2% P.

Аналогичная работа проведена А. А. Яскевич и А. М. Самариным [22], которые в качестве сырья использовали золу подмосковных каменных углей. В результате плавки в лабораторной печи мощностью 60 кВА они получали сплавы с содержанием до 30% Al и 40% Si.

Процесс плавки богатого ферросиликоалюминия, содержащего до 75% Al, исследовали В. Н. Веригин и Н. А. Адрианов

Опыты проводились в однофазной дуговой печи мощностью 600 кВт с проводящей подиной [25].

В качестве глиноземосодержащего сырья были использованы каолин (38% Al_2O_3 , 46% SiO_2 , 0,5% Fe_2O_3) и богатые глиноземом отходы электролизного производства («сметки»). Шихта предварительно подвергалась брикетированию или агломерации.

Шихта загружалась в печь отдельными порциями, процесс велся при закрытой дуге. Сплав выпускали из печи через каждые 4 часа. Полученный силикоалюминий содержал 55-75% Al; 23-43% Si и 1-2% примесей (Fe, Ti, и др.) [26].

Расчет экономической эффективности

Расчет экономической эффективности применения в производстве стальной продукции ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и ФС 65А10 ПФ ТОО "Кастинг" представлен в таблице 9

Таблица 9 - Расчет экономической эффективности применения в производстве стальной продукции ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и

ФС 65A10 ПФ ТОО "Кастинг".

	Использовалось при производстве сталей			Предлагается использование по результатам испытаний		
	Цена за единицу измерения на январь 2014г. (ПИА), тг без НДС	Среднегодовой фактический расход 2013 кг/тн	Сумма тг, без НДС на тонну	ФСА марок ФС55A10 и ФС 65A10 ПФ ТОО "KSP Steel" (предлагаемый)		
				По цене ферросилиция ФС 65-4	Фактический расход по карте опыта ФСА, кг/тн	Сумма тг, без НДС на тонну
70 Г	215447,1	3,2	689,4	215447,1	1,6	344,7
35 ГС	215447,1	9,8	2111,4	215447,1	1,2	258,5
Ш с хромо м	215447,1	3,3	711,0	215447,1	1,6	344,7

Продолжение таблицы 9

Предлагается использование по результатам испытаний			Отклонения в кг/т	Отклонения в тенге		
ФС марки ФС 65-4 (применяемый)		Сумма тг, без НДС на тонну		Перерасход, экономия на 1 т	За счет разницы цен	За счет разницы норм
Фактический расход по карте опыта ФС, кг/тн	Сумма тг, без НДС на тонну					
1,3	280,1	624,8	-0,3	-64,6	0,0	-64,6
8,3	1788,2	2046,7	-0,3	-64,6	0,0	-64,6
1,4	301,6	646,3	-0,3	-64,6	0,0	-64,6

Выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления:

- использование ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и марки ФС6510 в производство стали приведет к уменьшению себестоимости за счет снижения расхода ферросилиция;

- полная замена ферросилиция на ферросиликоалюминий возможна при разливке металла на МНЛЗ "под уровень", т.е. с 100% защитой струи металла погруженными стакан-дозаторами;

- использование ферросиликоалюминия при производстве стали 35ГС рекомендуется при стабильном производстве и обеспечении требуемыми материалами;

- применение ферросиликоалюминия привело к снижению содержания неметаллических включений в стали, и как следствие к улучшению качества стали и снижению возможности образования брака при прокате.

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Проблема охраны природы и рационального использования природных ресурсов отнесена к числу важнейших государственных задач [27].

Основные задачи по охране природы, стоящие перед металлургией, сводятся к следующим:

- постоянный контроль за состоянием окружающей среды и источником загрязнения с помощью новейших научно-технических средств с целью принятия необходимых мер для охраны природы;
- уменьшение вредного воздействия отходов металлургического производства на окружающую среду. С этой целью необходимо разрабатывать и внедрять технологические процессы, в том числе и процессы получения ферросплавов, обеспечивающие уменьшение отходов, а также их использование в собственно металлургическом (ферросплавном), смежных производствах и отраслях промышленности;
- использование в металлургической технологии воды (для охлаждения элементов конструкции электропечей, грануляции ферросплавов, шлаков и др.) по замкнутому циклу, для чего разрабатывать и внедрять в производство высокоэффективные очистные сооружения;
- разработка новых методов и средств борьбы с вредными выбросами веществ в атмосферу, воздействием электрических и магнитных полей и излучений, вибрациями и шумами;
- предохранение плодородных почв от загрязнения промышленными отходами (шлаками, стоками грязных вод и др.);
- осуществление мер по комплексному и рациональному использованию минерально-сырьевых и водных ресурсов;
- совершенствование прогнозирования влияния металлургического производства на окружающую среду, учет его возможных социальных и экономических последствий при разработке проектов металлургических агрегатов и предприятий, и, в частности, ферросплавных печей, цехов и заводов [28].

При современных масштабах металлургического производства, высоких темпах развития всех отраслей промышленности проблема охраны природы от вредных выбросов приобрела глобальный характер.

При нынешнем уровне техники и технологии выбросы предприятий черной металлургии составляют 7,52% всех загрязнений в мировом масштабе. Интегрированный металлургический завод производительностью 10 млн. т стали в год выбрасывает в год 220 тыс. т пыли, 50 тыс. т соединений серы, 250 тыс. т оксида углерода и других веществ [29].

Вредное действие выбросов металлургического и других производств проявляется как в непосредственном влиянии на человека, вызывая всевозможные профессиональные заболевания, так и в загрязнении водоемов, поражении лесных массивов, в конечном счете оказывая влияние на климат планеты. Установлено, что вследствие высоких темпов повышения концентрации CO_2 г в атмосфере, которая за 100 последних лет увеличилась на 10% создает опасность повышения температуры планеты в среднем на 2 -2,5°C,

и как полагают специалисты, может оказать существенное влияние на водный режим планеты и вызвать другие необратимые последствия. Диоксид углерода задерживает инфракрасное излучение, поэтому увеличение его содержания в земной атмосфере развивает так называемый «тепличный» или «парниковый» эффект, вследствие чего температура на нашей планете должна повышаться [30].

В ряде технически развитых стран также приняты соответствующие законы в области охраны окружающей среды.

Нормативными документами регламентируются допустимые концентрации вредных веществ в выбрасываемых в атмосферу газах, сточных водах и пр. Ограничены концентрации 50 твердых и 120 газообразных веществ. Предельно допустимые концентрации некоторых веществ по данным зарубежных специалистов приведены в таблице 10.

Таблица 10 - Допустимое содержание некоторых вредных веществ в воздухе, мг/м³

Вещество	Ближайший период времени	Для перспективного периода времени
Пыль с крупностью частиц:		
- 10 мкм	0,4	0,2
- 10 мкм	0,2	0,1
Хлор (Cl ₂)	0,3	0,1
Фторид кальция (CaF ₂)	0,3	0,1
Оксид углерода (CO)	30	10
Диоксид серы (SO ₂)	0,4	0,14
Сероводород (H ₂ S)	0,01	0,005
Диоксид азота (NO ₂)	0,3	0,1
Монооксид азота (NO)	0,6	0,2

Характеристика вредных выбросов в ферросплавном производстве. Основными вредными выбросами при получении ферросплавов являются колошниковые газы, шлаки и пылевидные образования. Количество и состав этих побочных продуктов электроферросплавного производства зависят от технологии выплавки ферросплавов, конструкции ферросплавных печей, а также от эффективности работы очистных сооружений. Наибольшее количество пылегазовыделений и отвальных шлаков приходится на процессы, связанные с использованием углерода как восстановителя, т. е. на углеродотермические процессы [31].

Колошниковые газы всех ферросплавных печей, производящих кремнистые, марганцевые и хромистые ферросплавы углеродовосстановительным методом, содержат 70—90% CO₂. Химический состав пылевидных выделений при выплавке различных ферросплавов зависит прежде всего от вида сплава. При получении ферросилиция основным

компонентом в шихте является кремнезем. При выплавке силикокальция наряду с SiO_2 в пыли много оксида кальция (до 20 - 24%). Для группы марганцевых ферросплавов характерно наличие в пыли оксидов марганца, хромистых ферросплавов — оксидов хрома и т. д. [32].

Выплавка ряда марок высококремнистых ферросплавов и прежде всего ферросилиция ФС90 и ФС75 пока не освоена в закрытых печах, поэтому на газоочистку приходится подавать не технологический колошниковый (подсводовый) газ, а газовоздушную смесь, поступающую в вытяжную шахту. Выплавка ферросплавов в закрытых печах позволяет резко сократить фактическое количество поступающих на очистку газов и уменьшает выбросы пыли с газами. Трудность решения задачи глубокой очистки технологических газов объясняется мелкодисперсностью пыли, содержащейся в газе.

Для очистки технологических газов в ферросплавном производстве применяют мокрую и сухую схемы газоочистки, которые имеют как преимущества, так и недостатки [33].

Преимущества мокрой газоочистки состоят в том, что колошниковый газ в контакте с водой сразу же охлаждается. Однако на последующих стадиях требуется очистка воды от твердых частиц и растворенных веществ, чтобы обеспечить работу газоочистки с оборотным водным циклом. Одним из наиболее распространенных вариантов сухой очистки газов является установка с тканевыми фильтрами. Основной недостаток этих установок — низкая стойкость ткани и высокие расходы, связанные с эксплуатацией. При получении ряда других ферросплавов (ферровольфрама, ферромolibдена и др.) сбор и очистка пылегазовыделений производится не только с целью охраны окружающей среды, но главным образом для улавливания дорогих и дефицитных оксидов вольфрама, молибдена и других ценных металлов.

Создание и эксплуатация комплекса очистных сооружений с целью охраны окружающей среды сопряжено с большими капиталовложениями [34].

Потребление технологической воды заводами черной металлургии ежегодно увеличивается на 2 - 3%.

Доля различных производств в потреблении воды и образовании сточных вод следующая: доменное — 25%, сталеплавильное — 20% и прокатное — до 40%.

Важной природоохранной задачей является уменьшение количества шлаков ферросплавного производства, а при невозможности их использования — правильная организация их складирования. Задача организации шлакоотвалов должна быть решена с учетом необходимости уменьшения затрат на погрузочно-транспортные расходы, а также характера и масштабов ущерба, который могут принести шлакоотвалы, особенно при складировании легко рассыпающихся шлаков силикотермического производства; марганца и феррохрома [35].

Для оптимального решения этих задач необходимо [36]:

- 1) определить состав и свойства отходов, а прежде всего их токсичность;

2) установить степень их проникновения в окружающую среду, характер грунта и наличие грунтовых вод, а также степень опасности загрязнения воздушного бассейна, например пылью, образующейся при разложении высокоосновных ($\text{CaO/SiO}_2 = 1,5 - 2,2$) шлаков металлического марганца и силикотермического феррохрома;

3) укладывать отвалы уплотненными слоями с образованием террас с таким расчетом, чтобы в дальнейшем можно- было разрабатывать эти шлаки;

4) хранить отходы различных ферросплавов отдельно по их видам для последующей утилизации, когда она окажется необходимой и возможной;

5) изучать возможность такой утилизации, для чего следует вести научные поиски в области использования различных отходов в ферросплавном производстве или в смежных отраслях промышленности [37].

Ферросплавные дуговые печи, единичная мощность которых достигла 75 МВ·А — мощный источник шума, сильных электромагнитных полей, которые отрицательно воздействуют на обслуживающий персонал. По данным американского института чугуна и стали 34% работников металлургических заводов ежедневно подвергаются воздействию шума сильнее 90 дБ, а 65%— сильнее 85 дБ. Использование экранов из листовой стали, звукопоглощающих материалов, упругих веществ, амортизирующих вибрацию, и других средств значительно снижает уровень шума, однако требует больших финансовых средств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большой спрос на ферросиликоалюминий объясняется тем, что он полностью превосходит по эффективности традиционные сплавы - ферросилиций и алюмокремниевые сплавы - при производстве рядовых марок стали на металлургических комбинатах. Универсальный раскислитель в процессе выплавки легированной стали заменяет все остальные ингредиенты. При выплавке комплексного сплава ФСА опробованы различные виды шихтовых материалов. Главное преимущество ФСА заключается в том, что при электротермическом получении этого сплава единица массы алюминия обходится дешевле, чем при производстве электролитического алюминия. Кроме того, раскислительная способность кремния и алюминия значительно повышается при их совместном действии. Содержание оксида железа не должно превышать 3,6 %. В ходе восстановительного процесса в электропечи железо восстанавливается практически полностью и увеличение его доли в шихте более 6 % сопровождается значительным снижением содержания кремния и алюминия в сплаве [38].

Выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления:

- использование ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и марки ФС6510 в производство стали приведет к уменьшению себестоимости за счет снижения расхода ферросилиция;

- использование ферросиликоалюминия при производстве стали 35ГС рекомендуется при стабильном производстве и обеспечении требуемыми материалами;

- применение ферросиликоалюминия привело к снижению содержания неметаллических включений в стали, и как следствие к улучшению качества стали и снижению возможности образования брака при прокате.

- рассмотрены основные сферы использования сплавов ФСА. Определены равновесные температуры восстановления углеродом оксидов металлов, входящих в состав ферросиликоалюминия, °С: 1544 - SiO_2 , 2095 - Al_2O_3 , 950 - Fe_2O_3 .

- показан расчет экономической эффективности применения в производстве стальной продукции ферросиликоалюминия марки ФС55А10 и ФС65А10 ПФ ТОО "KSP Steel".

- расчет прибыли металлургического производства показал, что лучшее качество стали достигается при использовании на установке "печь-ковш" в качестве раскислителя сплава ФСА в количестве 20-30 кг на одну плавку после отбора первой пробы на шлак. Экономический эффект основан на том факте, что за счет лучшей усваиваемости сплава ФСА расход кремния в сравнении со сплавом ФС65-4 сокращается на 20 - 25 %, а расход алюминия на 50 - 70 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Производство высоколегированных сталей. - М.: Metallurgy, 2002 г.-784 с.
2. Бабич В. К., Лукашин Н. Д., Морозов А. С., Поляк И. П., Соболевский А. Л., Тараканов Ю. В., Шемякова Л. Г. Основы металлургического производства. - М.: Metallurgy, 2001 г. - 281 с.
3. Некрасов В.М. Развитие металлургии на современном этапе.-М.: Metallurgy, 2003 г. - 22 с.
4. Капленко Ю.П., Колосов В.А., Харин С.А. Себестоимость железной руды: проблема снижения как определяющий фактор конкурентоспособности. - М.: Металлургическая и горнорудная промышленность, 2003 г. - 101 с.
5. Лаптева А. В поисках сырья. - М.: Национальная металлургия, 2003 г. - 251 с.
6. Сторчак С.А. и др. Комплексный подход к предотвращению техногенных аварий и утилизации отходов в горнодобывающих регионах. - М.: Металлургическая и горнорудная промышленность, 2003 г. -116 с.
7. Рысс М.А. Производство ферросплавов. М.: Metallurgy, 1985 г. -344 с.
8. Рябчиков И.В., Мизин В.Г., Лякишев Н.П., Дубровин А.С., Ферросплавы с редко - и щелочноземельными металлами. - М.: Metallurgy, 1999 г. - 272 с.
9. Гасик М.И., Зубов В.Л. Электрометаллургия ферросилиция. Д.: -Системные технологии, 2002 г. - 704 с.
10. Щедровицкий Я.С. Высококремнистые ферросплавы. Производство кремния и ферросилиция. - М.: Metallurgy, 2001 г. - 256 с.
11. Жучков В.И., Лукин С.В., Технология ферросплавов со щелочноземельными металлами. - М.: Metallurgy, 2002 г. - 104 с.
12. Щедровицкий Я.С. Сложные кремнистые сплавы. - М.: Metallurgy, 1986 г.- 175 с.
13. Степанянц С.Л. Автоматизация технологических процессов ферросплавного производства. - М.: Metallurgy, 1982 г. - 136 с.
14. Еднерал Ф.И. Электрометаллургия стали и ферросплавов.

- М.: Металлургия, 1977 г. - 488 с.
- 15 Куберский С. В., Алчевск. Электromеталлургия стали и ферросплавов. - М.: Металлургия, 2006 г. - 102с.
 - 16 Атаманюк В.Г., Ширшев Л.Г., Акимов Н. И.Черная металлургия: Учебник для вузов под ред. Д. И. Михайлика. - М.: Высшая школа, 2004 г. – 207 с.
 - 17 Хван Т.А. Хван П.А.Ферросплавы. Серия «Высшее образование». Ростов н/д.: «Феникс», 2005 г. – 416 с.
 - 18 Абдрахманов С.К. Черная металлургия. Информационно-справочное пособие. Алматы, 2006 г. – 276 с.
 - 19 Васильев П.П.Ферросилиций: Учебное пособие для вузов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003 г.-188с.
 - 20 Калыгин В.Г.Химия. Курс лекций. - М., Химия, 2006 г. - 520 с.
 - 21 Акимов В.А.Химия и металлургия. - М.: ФИД «Деловой экспресс», 2001 г. – 402 с.
 - 22 Мусина У.Ш. Теоретические основы неорганической химии. Учебное пособие. – Алматы: Каз НТУ, 2000 г. - 221 с.
 - 23 Строганова М.Н.Производство сталей. - М.: Металлургия, 1997 г. 164 с.
 - 24 Алексеев Ю.В. Металлы в химии. - Л.: Агропромиздат, 1987 г. – 142 с.
 - 25 Краснокутская О.Н., Кузьмич М.А., Выродова Л.П. Кремний в стали. - М.: Агрохимия, 1990 г. 128-140 с.
 - 26 Пронина Н.Б. Производство ферросилиция. - М.: Изд-во МСХА, 2000 г. – 312 с.
 - 27 Авцын П.А., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С.Классификация сталей. - М.: Химия, 1991 г. – 496 с.
 - 28 Щебровицкий Я. С. Высокремнистые ферросплавы. - М.: Металлургиздат, 1961 г.- 303 с.
 - 29 Щебровицкий Я. С. Производство ферросплавов в закрытых печах. - М.: Металлургия, 1975 г, - 312 с.
 - 30 Щебровицкий Я. С. Сложные кремнистые ферросплавы. - М.: Металлургия, 1966 г. - 176 с.
 - 31 Цветков Ю В., Панфилов С. А. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления. - М.: Наука, 1980 г. - 360 с.
 - 32 Титан В. А., Г армата. А. Н. Петрунько, Н.В., Галицкий и др. - М.: Металлургия, 1983 г.. - 559 с.
 - 33 Федоров В. Б., Шоршов М. Х., Хакимов Д. К. Углерод и его взаимодействие с металлами. - М.: Металлургия, 1978 г.- 208 с.

- 34 Утков В. А. Высокоосновный агломерат. - М.: Metallurgy, 1977 г.-156с.
- 35 Жуховицкий А. А., Белащенко Д. К., Бокштейн Б. С. и др. Физико-химические основы металлургических процессов. - М.: Metallurgy, 1973 г. - 392 с.
- 36 Ростовцева С. Т., Гасик М. И. Физико-химические основы металлургии марганца. - М.: Наука, 1977 г. - 262 с.
- 37 Мизин В. Г., Лякишев Н. П., Дубровин А. С. Металлы. - М.: Metallurgy, 1983 г. - 272 с.
- 38 Фиалков А. С. Углеграфитовые материалы. - М.: Энергия, 1979 г. - 320 с.