

№ 1138

МИСиС

А.В. Протасов

Б.А. Сивак

Н.А. Чиченев

Машины и агрегаты металлургического производства

Агрегаты внепечной обработки жидкой
стали

Курс лекций

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

№ 1138

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ
И СПЛАВОВ

МИСиС



Кафедра машин и агрегатов металлургических
предприятий

А.В. Протасов

Б.А. Сивак

Н.А. Чиченев

Машины и агрегаты металлургического производства

Агрегаты внепечной обработки жидкой
стали

Курс лекций

Допущено учебно-методическим объединением по
образованию в области металлургии в качестве учебного
пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению Металлургия

УДК 669.18:621.746
П78

Рецензент
канд. техн. наук, проф. *В.А. Чередников*

Протасов А.В., Сивак Б.А., А.Н. Чиченев

П78 **Машины и агрегаты металлургического производства: Агрегаты внепечной обработки жидкой стали: Курс лекций.** – М.: Изд. Дом МИСиС, 2009. – 182 с.

Изложены технологические основы, конструктивные особенности и опыт эксплуатации оборудования для внепечной обработки жидкой стали: агрегатов внепечной обработки стали без применения вакуума; струйных, ковшовых и рециркуляционных вакууматоров; комбинированных (многостендовых) агрегатов для реализации комплексных процессов получения высококачественной стали.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 150404 «Металлургические машины и оборудование», а также может быть полезно студентам направления 150100 «Металлургия», которые специализируются в области получения заготовок из непрерывнолитой стали. Может быть также использовано для курсового и дипломного проектирования при разработке технологии и оборудования для внепечной обработки жидкой стали.

© Государственный технологический университет «Московский институт стали и сплавов» (МИСиС), 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
Список сокращений.....	7
Введение.....	9
1. Агрегаты внепечной обработки стали без применения вакуума.....	17
1.1. Общие сведения.....	17
1.2. Агрегаты доводки стали инжекцией инертного газа и порошкообразных реагентов.....	19
1.2.1. Инжекционные способы рафинирования.....	19
1.2.2. Конструктивные особенности агрегатов доводки стали... ..	23
1.3. устройства для обработки расплава проволокой.....	34
1.3.1. Элементы технологического процесса.....	34
1.3.2. Конструктивные особенности трайб-аппаратов.....	37
1.3.3. Виды порошковой проволоки и ее производители.....	44
1.4. Агрегаты комплексной обработки стали с электродуговым и химическим нагревом.....	47
1.4.1. Элементы технологического процесса.....	47
1.4.2. Конструктивные особенности агрегатов «ковш- печь»	53
1.4.3. Агрегаты внепечной обработки с химическим нагревом.....	56
1.5. Внепечная обработка стали вне сталеразливочного ковша.....	57
2. Вакууматоры.....	60
2.1. Струйные вакууматоры.....	60
2.1.1. Классификация вакууматоров.....	60
2.1.2. Конструктивные особенности струйных вакууматоров ...	64
2.1.3. Поточные вакууматоры.....	69
2.2. Ковшовые вакууматоры.....	75
2.2.1. Вакууматоры без нагрева и продувки кислородом.....	75
2.2.2. Вакууматоры с дугowym нагревом.....	83
2.2.3. Вакууматоры с окислительным вакуумированием.....	88
2.3. Рециркуляционные вакууматоры.....	93
2.3.1. Порционные вакууматоры.....	93
2.3.2. Циркуляционные вакууматоры.....	101
2.3.3. Оборудование для пульсационного перемешивания расплава.....	107
2.3.4. Конструктивные особенности порционных и циркуляционных вакууматоров.....	109

3. Комбинированные процессы и агрегаты.....	111
3.1. Комплексные технологические процессы получения высококачественной стали	111
3.2. Многофункциональные одностендовые агрегаты.....	113
3.3. Двухстендовые агрегаты вакуумирования и нагрева	116
3.3.1. Агрегаты ASEA–SKF	116
3.3.2. Агрегаты LF+VD	120
3.3.3. Агрегаты LF+RH.....	122
3.3.4. Другие варианты многостендовых агрегатов	122
3.4. Многопозиционные агрегаты повышенной производительности	124
4. Конструктивные элементы технологического оборудования внепечной обработки стали	130
4.1. Ковши для внепечной обработки.....	130
4.2. Вакуумные камеры струйных и ковшовых вакууматоров.....	139
4.3. Вакуумные камеры рециркуляционных вакууматоров.....	142
4.4. Механизмы перемещения ковша и вакуум- камеры	145
4.5. Устройства контроля параметров металла.....	149
4.6. Средства нагрева футеровки	152
4.7. Газоотводящий тракт агрегатов внепечной обработки стали	155
4.8. Откачное оборудование	160
4.9. Оборудование для ремонта ковшей и скачивания шлака.....	167
4.10. Оборудование для ремонта футеровки вакуум- камеры	171
4.11. Сталевозы	173
4.12. Система хранения, дозирования, транспортировки и подачи материалов	175
Заключение.....	179
Библиографический список.....	181

ПРЕДИСЛОВИЕ

В 1976 году известный специалист в области внепечной обработки стали Джон Лич (British Steel, Великобритания) писал: «Русские опубликовали много статей на тему внепечной обработки стали, но вряд ли смогли бы что-нибудь показать, если бы их об этом попросили». Было бы большим преувеличением утверждать, что отечественные ученые, технологи и конструкторы за прошедшее с тех пор время достигли выдающихся результатов в данной области. Следует отметить, что большая часть проектов, разработанных в СССР, оказалась невостребованной ввиду недостаточного финансирования, а также вследствие отсутствия спроса на высококачественную сталь, характерного для рыночной экономики. Тем не менее в нашей стране накоплен определенный опыт в области создания и эксплуатации многих видов оборудования для внепечной обработки, требующий систематизации и обобщения.

Необходимость написания данного курса лекций обусловлена тем, что прошел достаточно большой срок со времени публикации последних комплексных аналитических обзоров на данную тему, а также возникновением в мировой и отечественной металлургии новых тенденций, разработкой новых процессов и устройств, заслуживающих изучения и распространения. Кроме того, предыдущие фундаментальные работы написаны технологами и предназначены для технологов. Они, как правило, содержат подробное теоретическое описание физико-химических основ протекающих процессов, но сведения о параметрах и конструктивных особенностях применяемого оборудования при этом носят отрывочный и фрагментарный характер.

Между тем эффективность использования того или иного вида внепечной обработки существенно зависит от надежности оборудования и соответствия его параметров решаемым технологическим задачам.

Работоспособность и эксплуатационная готовность агрегатов внепечной обработки в значительной степени зависят от вспомогательного оборудования сталеплавильных цехов: сталевозов, тракторов подачи сыпучих материалов, ремонтных стендов и т.д. Обычно этим видам оборудования не уделяется достаточного внимания. Поэтому необходимо рассматривать весь комплекс машин, обеспечивающих проведение внепечной обработки стали.

Опубликованные в специальной литературе материалы не дают достаточного представления об известных и вновь создаваемых видах оборудования как о систематизированном наборе апробированных на практике унифицированных узлов и систем (модулей), из которых в сжатые сроки и с минимальными затратами возможно создание агрегатов с оптимальными технологическими возможностями.

В данном курсе лекций рассмотрены наиболее распространенные агрегаты внепечной обработки стали и даны рекомендации по выбору конструктивных схем и параметров основного и вспомогательного оборудования.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АКОС – агрегат комплексной обработки стали (агрегат типа «ковш-печь»).

АКП – агрегат «ковш-печь».

АПВ – агрегат поточного вакуумирования, реализующий способ струйного вакуумного рафинирования стали при непрерывной разливке.

ККЦ – кислородно-конвертерный цех.

ММЗ – Молдавский металлургический завод.

ММК – Магнитогорский металлургический комбинат.

МНЛЗ – машины непрерывного литья заготовок.

НЛМК – Новоліпецкiй металлургічний комбінат.

AOD – процесс дегазации металла в результате создания над ним инертной среды (argon oxygen degassing)

ASEA-SKF (или *ASEA*) – двухстендовый агрегат, включающий тигель-ковш для вакуумирования и установку электрического нагрева.

BV – процесс вакуумирования струи металла при выпуске из сталеплавильного агрегата (по названию фирмы-разработчика Bohumer Verein).

DH – процесс порционного вакуумирования (по названию западногерманской фирмы Dortmund Herder Huttenunion).

ELVAC – комплексный процесс получения полупродукта в дуговой электропечи, включающий его последующую обработку в агрегате «ковш-печь» и циркуляционном вакууматоре, разливку готовой стали на МНЛЗ.

LF – агрегат электродугового подогрева плавки в ковше или в агрегате «ковш-печь» (ladle furnace).

LF+VD – двухстендовый агрегат, включающий ковшовый вакууматор и агрегат «ковш-печь».

LF+RH – двухстендовый агрегат, включающий циркуляционный вакууматор и агрегат «ковш-печь».

LL – процесс вакуумирования струи при переливании стали из ковша в ковш (ladle-to-ladle).

NK-AP – вариант агрегата «ковш-печь» (по названию японской фирмы Nippon Kokan – Arc process).

PM – процесс пульсационного рециркуляционного вакуумирования (Pulsating Mixing Process).

RH – процесс циркуляционного вакуумирования (по названию западногерманской фирмы – Ruhrstahl Heraeus).

TD – процесс вакуумирования струи при выпуске металла из печи (tap degassing).

VAD – процесс ковшового вакуумирования с перемешиванием и электродуговым подогревом металла (vacuum arc degassing – вакуумно-дуговая дегазация).

VD – способ ковшового вакуумирования путем выдержки сталеразливочного ковша с металлом при пониженном давлении с принудительным перемешиванием ванны инертным газом.

VFH – комбинация агрегатов *VAD* и *VOD* (Vakuum Frisch und Heiz – процесс окисления под вакуумом с подогревом).

VOD – процесс обработки стали кислородом при вакуумировании стали (vacuum oxygen decarbonisation – вакуумно-кислородное обезуглероживание).

VOH – процесс вакуумно-кислородного нагрева (vacuum oxygen heating) стали в конвертере; разновидность процесса *VOD*.

ВВЕДЕНИЕ

Отдельные элементы внепечной обработки появились одновременно с выплавкой стали. Уже тогда металлурги практиковали скачивание шлака с поверхности жидкого металла, присадку разнообразных добавок и их механическое перемешивание. Эти процессы в усовершенствованном виде дошли до наших дней и получили свое развитие с учетом возможностей современной техники. Однако первые, весьма приблизительные аналоги современных процессов появились значительно позднее, как и само понятие «внепечная обработка стали», или «вторичная металлургия».

Впервые в мировой практике Г. Бессемер в 1865 году получил патент на обработку металла при пониженном давлении. В 1882 году Р. Айткен предложил способ, напоминающий современное порционное вакуумирование. В 1883 году Р. Гордон получил патент на способ отливки слитков в вакууме. В 1931 году Е. Вильямс предложил способ, представляющий собой отдаленный прототип циркуляционного вакуумирования. Первый способ вакуумирования стали в ковше запатентован в 1940 году А.М. Самариным и Л.М. Новиком.

Промышленное внедрение внепечного вакуумирования жидкой стали многие годы сдерживалось отсутствием необходимого откачного оборудования, и лишь в 1952 году после многочисленных опытов, проведенных в различных странах, было осуществлено промышленное вакуумирование струи металла на заводе объединения *Vochumer Verein* (ФРГ), а в 1953 году – ковшовое вакуумирование кипящей и рельсовой стали на Енакиевском металлургическом заводе.

В 50-е годы прошлого века на отечественных металлургических заводах был внедрен ряд струйных и ковшовых вакууматоров («Днепрспецсталь», имени Дзержинского, «Красный Октябрь», «Уралмаш», Верх-Исетский и др.). Однако в дальнейшем опережающими темпами внепечное рафинирование стали стало развиваться в зарубежных странах. Тогда же были внедрены основные виды агрегатов внепечной обработки, применяемые до настоящего времени.

Первым из современных способов внепечного рафинирования в промышленности было реализовано порционное вакуумирование (1956 год), получившее в зарубежной литературе название *процесс DH* по наименованию западногерманской фирмы *Dortmund Herder Huttenunion*, затем в 1959 году появилось циркуляционное вакуумирование (*процесс RH* – *Ruhrstahl* Heraus).

Необходимо отметить, что еще в 1948 году А.М. Самарину и Л.М. Новику было выдано авторское свидетельство на способ ковшового вакуумирования с индукционным перемешиванием, однако лишь в середине 1960-х годов данный способ был применен американской фирмой Republic Steel для обработки плавок массой 40 и 80 тонн на заводах в Кливленде и Кентоне.

В середине 1960-х годов почти одновременно в нескольких странах были созданы разновидности ковшового вакуумирования с перемешиванием и электродуговым подогревом металла. Работы по их созданию проводились в Швеции фирмой ASEA, в ФРГ – фирмой Standard Messo, в США – фирмами Finkl и Mohr, во Франции – фирмой Heurtey. Впервые вакуумно-дуговая дегазация с перемешиванием инертным газом была осуществлена на заводе фирмы Finkl в Чикаго (США) в 1968 году.

В дальнейшем этот процесс получил распространение под обозначением *VAD* (vacuum arc degassing – вакуумно-дуговая дегазация).

Возрастающая потребность различных отраслей промышленности в хромистых нержавеющей сталях с особо низким содержанием углерода привела к появлению различных методов вакуумно-кислородного рафинирования. Метод обработки стали кислородом при вакуумировании стали в ковше впервые применен для обработки 50-тонных ковшей на заводе в г. Виттене (ФРГ) в 1967 году. Впоследствии были разработаны различные варианты процесса с соответствующими обозначениями; однако наиболее употребительным является обозначение *VOD* (vacuum oxygen decarbonisation – вакуумно-кислородное обезуглероживание).

К началу 1970-х годов наметилось существенное отставание отечественной промышленности в данной области от ведущих стран, и образцы основных типов агрегатов внепечной обработки стали были приобретены по импорту. Характерно, что прогрессивная для того времени техника была приобретена для машиностроительных заводов, производящих сталь ответственных и особо сложных марок: ПО «Ижорский завод»; завода «Энергомашспецсталь» в г. Краматорске.

Первые полупромышленные циркуляционные вакууматоры конструкции института «Стальпроект» были также установлены на машиностроительных заводах: «Баррикады» (г. Волгоград) и «Большевик» (г. Ленинград).

В СССР технологические основы процессов вторичной металлургии разрабатывались во многих научно-исследовательских и учебных институтах: ИМЕТ имени А.А. Байкова АН СССР (г. Москва),

ИЧМ (г. Днепропетровск), НИИМ (г. Челябинск). Большой вклад в разработку теории циркуляционного вакуумирования внесли ученые Московского института стали и сплавов. С конца 1970-х годов обязанности головного института, отвечающего за технологию и техническую политику в области внепечной обработки стали, возложены на ЦНИИЧЕРМЕТ имени И.П. Бардина. Головным разработчиком оборудования был определен ВНИИМЕТМАШ, разработавший целый ряд проектов агрегатов основных типов.

Первые отечественные вакууматоры порционного типа ВП-130 и ВП-350, разработанные во ВНИИМЕТМАШе, были введены в строй в 1982 году. Несмотря на полученные положительные результаты, дальнейшее развитие отечественной внепечной обработки стали затянулось. Причины отставания в данной области от ведущих стран весьма многообразны, однако главной из них в тот период явилось отсутствие прямой экономической заинтересованности металлургов в производстве металла высокого качества. Широкому распространению отечественных агрегатов в 1970–1980-е годы препятствовали такие факторы, как межведомственные барьеры, отсутствие ряда отечественных комплектующих изделий требуемого качества (термостойких вакуумных уплотнений, быстродействующих паровых клапанов, вакуумметров и др.), недостаток опыта создания и освоения агрегатов внепечной обработки стали.

К началу 1990-х годов большая часть перечисленных проблем была успешно решена, остальные потеряли свою актуальность. Отсутствие спроса на металлопродукцию на внутреннем рынке привело к переориентации отечественных металлургов на экспортные поставки с жесткими требованиями к качеству, что заставило предприятия вплотную заняться проблемами вторичной металлургии. Стремительный рост цен на сырье и энергоносители в эти годы обусловил дальнейшее повышение интереса к внепечной обработке стали, которая дает возможность решать проблемы не только повышения качества продукции, но также ресурсосбережения, защиты окружающей среды, организации производства и повышения его эффективности.

К этому времени отечественными машиностроителями, и в том числе ВНИИМЕТМАШем, был накоплен значительный опыт создания и освоения агрегатов внепечной обработки стали, изучена практика эксплуатации импортных вакууматоров и агрегатов доводки стали. Это позволило разработать серию конкурентоспособных агрегатов доводки стали для ковшей емкостью 160 и 385 тонн, а также

циркуляционных и порционных вакууматоров для ковшей емкостью 130, 160, 250 и 385 тонн.

Разрушение жесткой централизованной системы управления промышленностью позволило предприятиям самостоятельно привлекать любых соисполнителей и организовывать комплектную поставку сложных видов оборудования. Возможность приобретения конвертируемой валюты решила проблему обеспечения поставляемого оборудования любыми импортными комплектующими изделиями требуемого качества. Таким образом, к началу 1990-х годов в стране были созданы предпосылки для кардинального улучшения ситуации с внепечной обработкой стали.

Однако проявились и негативные тенденции: неконтролируемый рост цен и отсутствие оборотных средств у предприятий, ослабление связей с партнерами, оказавшимися в других странах СНГ. Общий кризис промышленности воздвиг новые барьеры на пути развития вторичной металлургии, что привело к прекращению работ над рядом проектов. В это время несколько агрегатов были приобретены у зарубежных фирм, которые начали доминировать на отечественном рынке.

Можно утверждать, что внепечная обработка жидкой стали является ключевым звеном современного сталеплавильного производства. Она распространена практически на всех металлургических заводах и включает разнообразные операции, начиная с простого перемешивания в целях усреднения температуры и химического состава металла во всем объеме ковша и кончая сложнейшими технологическими процессами с применением вакуума и нагрева.

Разработано и широко применяется в промышленности большое число различных агрегатов внепечной обработки разного назначения с широким спектром технических параметров.

В современной технологической схеме производства внепечная обработка начинается уже на выпуске стали из сталеплавильного агрегата и заканчивается в промежуточной ковше машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). При этом процесс получения жидкой стали разделяется на два основных технологических этапа: производство нерафинированной стали в плавильном агрегате (*первичная металлургия*) и осуществление вне печи различных металлургических процессов: раскисления, рафинирования синтетическими шлаками, десульфурации, дегазации, присадки легирующих материалов, регулирования температуры и достижения заданного химического

состава (*вторичная металлургия, или внепечная обработка металла*).

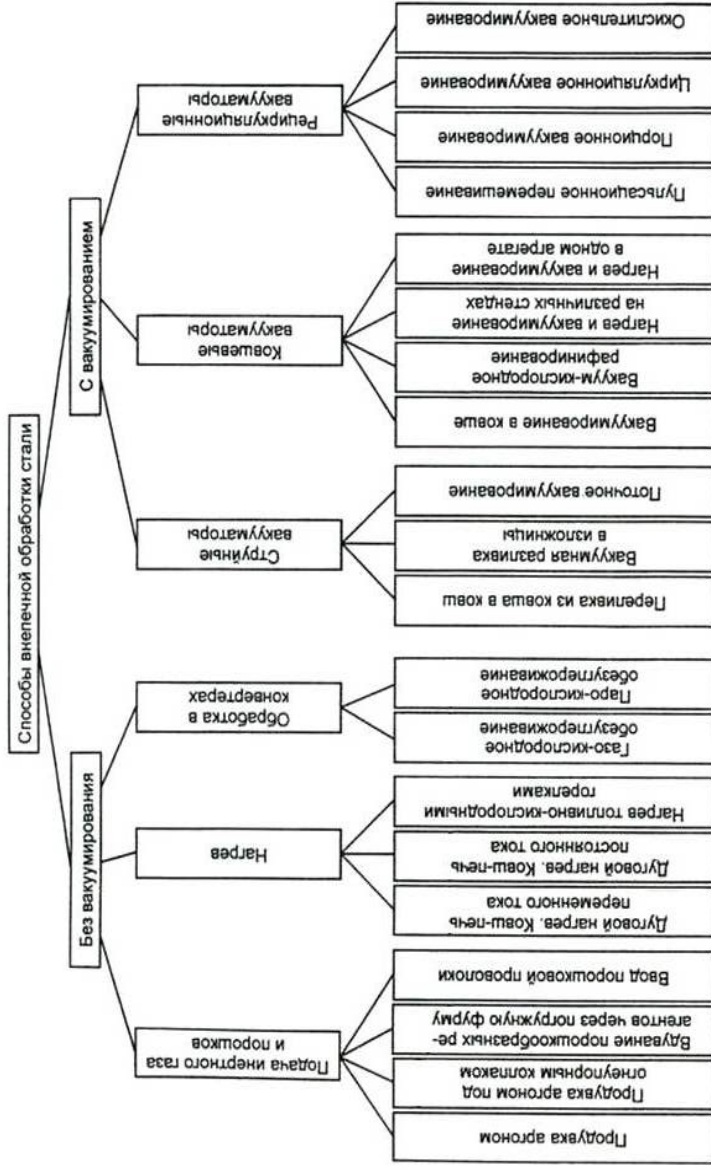
Применение внепечной обработки металла позволяет:

- сократить продолжительность плавки в плавильном агрегате, ограничив ее временем расплавления шихты и получения полупродукта;
- уменьшить расход огнеупорных материалов, электродов, электроэнергии в плавильном агрегате;
- обеспечить расширение марочного сортамента производимой стали и получать стали вновь разработанных марок с уникальными свойствами;
- улучшить организацию технологических процессов используя агрегаты внепечной обработки в качестве «буфера» между печными агрегатами и разливкой металла;
- существенно улучшить условия труда обслуживающего персонала, снизить выбросы в атмосферу и уменьшить загрязнение окружающей среды.

В сталеплавильном агрегате трудно обеспечить оптимальные условия протекания отдельных реакций, составляющих комплекс процессов рафинирования чугуна. Особенно невыгодны условия для наиболее важных реакций – удаления серы и фосфора. Эти операции часто переносят во внепечные агрегаты, специально предназначенные для этих целей. Разработаны различные модификации этих процессов, которые, как правило, включаются в качестве обязательных операций в технологический цикл производства стали.

В процессе внепечной обработки могут быть решены разнообразные технологические задачи. Их примерный перечень и способы реализации приведены в таблице. При этом в зависимости от конкретных условий осуществления технологического процесса дополнительно проводят операции по контролю температуры металла и его химического состава, удалению шлака, подаче теплоизолирующих смесей и т.д.

Разработано и широко применяется в промышленности большое число различных агрегатов внепечной обработки разного назначения с широким спектром технических параметров. Основные технологические процессы внепечной обработки с обозначениями, употребляемыми в отечественной и зарубежной литературе, приведены на рисунке.



Классификация способов внепечной обработки стали

Среди этих процессов можно выделить две основные группы:

1 – обработка стали в ковше без применения вакуума (главным образом, инъекционные способы);

2 – вакуумирование стали.

Внепечной обработке может подвергаться:

– весь металл – в ковше или конвертере;

– отдельные его порции – в вакуум-камере или промежуточной емкости;

– струя металла – при выпуске из плавильного агрегата, переливе из ковша в ковш или разливке.

Широкими технологическими возможностями обладают агрегаты внепечной обработки стали в ковше с применением вакуумирования и нагрева, в которых можно осуществить несколько технологических операций. Однако реализация в одном агрегате всех возможных операций приводит к усложнению его конструкции, и, как следствие, – росту стоимости оборудования.

Агрегаты внепечной обработки устанавливают между сталеплавильными агрегатами (мартеновской печью, кислородным конвертером или электродуговой печью) и участками разливки.

Обработка металла отдельными порциями в специальных вакуум-камерах дает возможность выполнять большинство известных технологических операций при несколько большей интенсивности процессов.

Наиболее просты и дешевы агрегаты для обработки металла в струе. Они обеспечивают высокую степень интенсивности процесса, однако возможности регулирования процесса и набор операций ограничены.

1. АГРЕГАТЫ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМА

1.1. Общие сведения

Широкий круг технологических задач может быть в той или иной степени решен без применения вакуума: раскисление, легирование, десульфурация, перемешивание, вдувание инертных газов и др. Поэтому любой современный агрегат внепечной обработки стали оснащается средствами для хранения, дозирования и введения раскислителей и легирующих материалов различных видов, а также трубопроводами и фурмами для вдувания инертного газа или газопорошковой смеси.

Основная часть способов внепечной обработки стали осуществляется в приспособленных для этого сталеразливочных ковшах с основной футеровкой и шиберными затворами. С целью снижения тепловых потерь и во избежание выбросов газов и пыли в атмосферу цеха ковши, подвергаемые внепечной обработке, снабжаются крышками и экранами, соединяемыми с газоочистными сооружениями цеха. Управление технологическими процессами внепечной обработки стали осуществляется при помощи автоматизированной системы управления на основе данных контроля параметров плавки, получаемых посредством специальных устройств.

Основные операции, проводимые в агрегатах внепечной обработки стали без применения вакуума, приведены на рис. 1.1.

Основные требования, предъявляемые к современным агрегатам внепечной обработки стали:

- широкие технологические возможности;
- высокая производительность;
- простота и надежность конструкции;
- высокая эксплуатационная готовность;
- минимальные расходы материалов и энергоносителей;
- низкие капитальные и эксплуатационные затраты;
- совместимость с работой плавильных агрегатов и машин непрерывного литья заготовок;
- минимальное воздействие на атмосферу цеха и окружающую среду.