

В.А. БЕЛЕВИТИН

**Инновационные технологии
трансформации качества
конструкционных материалов**



**Челябинск
2024**

**МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный
гуманитарно-педагогический университет»

**Инновационные технологии
трансформации качества
конструкционных материалов**

Учебное пособие

**Челябинск
2024**

УДК 621.22 (021)

ББК 34.43я73

Б 43

Белевитин, В.А. Инновационные технологии трансформации качества конструкционных материалов: учебное пособие / В.А. Белевитин; Министерство просвещения РФ, Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет. – Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2024. – 207 с. – ISBN 978-5-907869-11-0. – Текст: непосредственный.

Учебное пособие посвящено описанию применяемых в современной металлургии инновационных конструктивно-технологических процессов производства конструкционных материалов, способствующих снижению дефектности конечной продукции по неметаллическим включениям до незначительного уровня. Наибольшее внимание уделено основанным на научных физико-химических принципах методам и технологиям обработки жидкой стали вакуумом и модификаторами, а также различным видам рафинирующего переплава. Особо отмечается роль внепечной обработки жидкой стали как наиболее определяющей экономичность и качество выплавляемого металла металлургической технологии XXI века.

Пособие адресовано студентам, обучающимся по программе бакалавриата направления подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям), профиль «Транспорт».

Рецензенты: М.С. Дмитриев, д-р техн. наук, доцент
К.Н. Семендяев, канд. техн. наук

ISBN 978-5-907869-11-0

© В.А. Белевитин, 2024

© Издательство Южно-Уральского
государственного гуманитарно-
педагогического университета, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИ	5
Часть 1. ПРИМЕСИ И ПРИМЕСНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ	
В СТАЛИ	7
1.1. Физико-химические основания влияния	
Примесей и примесных включений в стали	7
1.1.1. Состав и влияние примесей в стали	7
1.1.2. Ликвации, роль и влияние примесей в стали.....	17
1.2. Влияние неметаллических включений на свойства	
стали и методы их количественной оценки	30
1.2. Влияние редкоземельных и щелочноземельных	
металлов на неметаллические включения	37
Контрольные вопросы	54
Часть 2. АГРЕГАТЫ, МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ	
СТАЛИ МОДИФИКАТОРАМИ.....	56
2.1. Наилучшие доступные технологии производства	
стали в конвертерах	56
2.1.1. Десульфурация расплава в конвертере	57
2.1.2. Главные особенности внепечной обработки	
жидкой стали	59
2.1.3. Внепечная обработка жидкой стали	
в сталеразливочном ковше	63
2.1.4. Рафинирующая внепечная обработка жидкой	
стали вакуумом	73
2.1.5. Внепечная обработка жидкой стали	
в агрегатах «ковш-печь»	76
2.1.6. Основные способы вакуумирования	
жидкой стали	79

2.1.7. Тренд агрегатов комплексной обработки жидкой стали	103
Контрольные вопросы	109
Часть 3. КОМБИНИРОВАННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАВКИ И ДОВОДКИ СТАЛИ	110
3.1. Кардинальные изменения технологического процесса выплавки стали	110
3.2. Плазменно-дуговые печи выплавки и доводки стали	114
3.3. Вакуумно-дуговые печи	117
3.4. Вакуумно-индукционные печи	121
3.5. Плазменно-дуговой переплав	127
3.6. Электронно-лучевой переплав	133
3.7. Электрошлаковые печи	144
Контрольные вопросы	153
Часть 4. РАСКИСЛЕНИЕ И ВАКУУМНАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ	155
4.1. Раскисление стали	155
4.2. Внепечная обработка стали.....	163
Контрольные вопросы	182
Часть 5. ЦИФРОВИЗАЦИЯ МЕТАЛЛУРГИИ.....	184
5.1. Цифровизация производства	184
5.2. Трансформация металлургических заводов: роль инноваций и цифровизации	186
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	197
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	198

ВВЕДЕНИЕ

С освоением производства стали в кислородных конвертерах возникла объективная потребность проведения операций раскисления, легирования и рафинирования кислородно-конвертерного полупродукта в сталеразливочном ковше. Кислородный конвертер позволил резко увеличить производительность в сталеплавильном производстве, продуктом кислородно-конвертерной плавки которого является не готовая сталь, а окисленный полупродукт, так как он приспособлен лишь для проведения окислительных операций обезуглероживания и дефосфорации. В отличие от электросталеплавильных и ранее существовавших мартеновских печей это обусловило острую необходимость проведения операций внепечной обработки – раскисления, легирования и рафинирования кислородно-конвертерного полупродукта в сталеразливочном ковше, в котором расплав окисленного полупродукта подвергается специальной обработке на одном или нескольких специализированных агрегатах, то есть, по-существу, формируется сталь необходимого химического состава и требуемого качества. Термодинамические условия проведения технологических операций раскисления, легирования и рафинирования в специализированных внепечных агрегатах (вакуум, регулируемый состав атмосферы, шлак оптимального состава) и более благоприятные кинетические условия (интенсивное перемешивание, большая поверхность взаимодействия фаз,

введение добавок в объём расплава и др.) способствуют достижению существенных результатов в значительном повышении точности и стабильности по обеспечению качества металла. Помимо того, использование внепечных методов обработки расплава окисленного полупродукта позволило освоить производство металла, получение которого традиционными способами было бы невозможно.

Широкое использование агрегатов внепечной обработки началось со второй половины 50-х годов XX века. В настоящее время внепечная обработка является обязательным элементом технологии производства стали. Она начинается уже на выпуске полупродукта из плавильного агрегата в сталеплавильный ковш и заканчивается в промежуточном ковше и даже в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), т.е. целью внепечной обработки является не только получение из окисленного полупродукта стали требуемого состава с необходимыми характеристиками и требуемого качества, но и подготовка расплава к разливке. Повышение требований потребителей к качеству металлопродукции по свойствам, определяемым содержанием в металле углерода и растворённых газов, способствовало, в частности, разработке и широкому использованию методов внепечной обработки в вакууме.

В XXI веке классические сталеплавильные агрегаты будут использоваться только для расплавления шихты. Основные технологические операции, определяющие экономичность и качество выплавляемого металла, будут производиться в агрегатах для внепечной обработки.

Часть 1. ПРИМЕСИ И ПРИМЕСНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В СТАЛИ

1.1. Физико-химические основания влияния примесей и примесных включений в стали

1.1.1. Состав и влияние примесей в стали

Сталь фактически является многокомпонентным железоуглеродистым сплавом. В углеродистой стали кроме основных компонентов (железа и углерода) присутствует ряд примесей: марганец (Mn), кремний (Si), сера (S), фосфор (P) и др.

Присутствие разных примесей объясняется соответствующими причинами. Марганец Mn и Si в десятых долях процента переходят в сталь в процессе её раскисления (восстановление окисла железа FeO , растворенного в жидкой стали); S и P в сотых долях процента остаются в стали из-за трудности их полного удаления; хром (Cr) и никель (Ni) переходят в сталь из шихты, содержащей легированный металлический лом, и допускаются в количестве менее 0,3 % каждого [1].

Примеси подразделяются на несколько групп [2]:

1. К постоянным относят серу, фосфор, марганец и кремний. Они всегда содержатся в стали в небольших количествах, попадая в нее из чугуна или используясь в качестве раскислителей.

2. К скрытым относят водород, кислород и азот. Они тоже присутствуют в любой стали, попадая в нее при выплавке.

3. К случайным относят медь, мышьяк, свинец, цинк, олово и прочие элементы. Они попадают в сталь из шихтовых материалов и считаются особенностью руды, т.е. специально в сталь не добавляются (например, V в Качканарских железных рудах). Чаще всего этими элементами бывают Cr , Cu , Al , Ti в количествах, ограниченных для примесей. Косвенно случайные примеси попадают в сталь с легирующими элементами, специально вводимыми для получения определённых свойств (жаропрочности, коррозионной устойчивости и пр.), а также при раскислении стали и могут участвовать в образовании неметаллических включений (НВ). Удаление НВ простыми металлургическими процессами сопряжено с множеством трудностей и подчас практически не осуществимо.

Для каждой из вышеперечисленных примесей характерно определенное процентное содержание. Обычно Mn в стали, как правило, не более 0,8 %, Si – не более 0,4 %, P – не более 0,025 %, S – не более 0,05 %. Допустимые количества примесей в сталях регламентируются соответствующими стандартами.

Примеси оказывают влияние на технологические и механические свойства стали. Так, например, Mn и Si являются полезными примесями, поскольку они раскисляют сталь, повышают твердость и прочность. P придает стали хладноломкость – хрупкость при нормальной и пониженных температурах, а S – горячеломкость (или краснолом-

кость) – хрупкость при температурах горячей обработки давлением. Таким образом, *S* и *P* являются основными вредными примесями. Плохое влияние сера оказывает не только на красноломкость из-за появления на границах зерен сульфидных эвтектик, имеющих низкую способность к плавке, но и на свариваемость, пластичность и ударную вязкость стали. Склонность к сегрегации на границах зерен у серы значительна. Вредное воздействие серы на сталь снижает марганец. При жидком состоянии сплава он вступает в реакцию с образованием сульфида марганца, температура плавления которого составляет +1620 °С. Она значительно превышает температуру горячей обработки металла (от +800 °С до +1200 °С). При таком нагреве сульфиды марганца достаточно пластичны и легко деформируются. Сегрегация фосфора (*P*) в значительно меньшей, чем серы и углерода, степени происходит в ходе затвердевания сталей. Идёт его растворение в феррите (твёрдый раствор углерода в альфа-железе), из-за чего прочность металла увеличивается. Чем больший процент фосфора содержит сталь, тем выше её хладноломкость, но ниже ударная вязкость, пластичность. Чем ниже при затвердевании стали становится температура, тем меньше растворимость фосфора, постепенно снижаясь с 1,2 % до 0,02–0,03 %. Именно такое содержание растворённого в альфа-железе данного химического элемента наблюдается в сталях, что способствует замедлению распада мартенсита и повышению упрочняемости стали.

Вредными примесями в стали являются не только сера и фосфор, но и углерод [3]. Медленно остывающая сталь приобретает структуру, состоящую из двух фаз – цементита Fe_3C и феррита. Цементит связан в стали с углеродом. Его содержание прямо пропорционально количеству последнего. При этом цементит имеет твердость, значительно превышающую жесткость феррита. Цементит, вошедшие в его состав частицы (хрупкие, твердые), увеличивают сопротивляемость деформации, повышая противодействие движению дислокаций как основного механизма деформации металла. Дислокации, скапливаясь от противодействия их движению, преобразуются в микродефекты, а затем – в микротрещины, в результате чего показатели пластичности (относительное удлинение δ , относительное сужение ψ) и вязкость подвергнутого деформации металла снижаются. Как следствие, при возрастании процента углерода происходит увеличение твердости стали, пределов ее текучести и прочности, снижение относительных сужения и удлинения, а также ударной вязкости. То есть, чем больше углерода, тем легче сталь переходит в хладноломкое состояние. Если содержание углерода в стали колеблется в диапазоне 1,0–1,1 %, то растет твердость металла в отожженном состоянии. При этом предел прочности снижается. Такое явление, как снижение прочности, наблюдается по причине выделения аустенита вторичного цементита на границах бывшего зерна. Этот цементит делает сплошную сетку в сталях с вышеуказанным составом. В ходе растяжения сетка напрягается и цемент, хрупкий по своей природе, начинает разру-

шаться. Все это является причиной распада и последующего уменьшения предела прочности. Увеличивая количество углерода, можно добиться уменьшения плотности стали, увеличения электропроводности, коэрцитивной силы, снижения остаточной индукции, теплопроводности и магнитной проницаемости.

Присутствие в стали азота (N), также относящегося к вредным примесям, оказывает негативное воздействие в металле за счёт образования нитридов, представляющих собой неметаллические хрупкие инородные тела, которые делают свойства стали значительно хуже. К положительным, в какой-то мере, сторонам примеси азота стоит отнести его способность к увеличению аустенитной области диаграммы состояния металла. Кроме того, азот способен заменить собой в сталях никель (но только частично).

Даже небольшое количество олова (Sn) вредно для стали. В легированных сталях этот элемент способен вызывать отпускную хрупкость. Кроме того, олово сегрегируется на границах зерен стали, уменьшает её горячую пластичность в аустенитно-ферритной области диаграммы состояния.

Одна из самых опасных вредная примесь в стали – водород (H), особенно в процессе сварки. Водород может находиться в металле в виде гидрида (связанном) или в диффузно-подвижном состоянии (в виде твердого раствора), а молекулярный H содержится в микронесплошностях материала. В процессе сварки водород излишне охрупчи-

ваает сталь, попадая в расплав из атмосферы дугового разряда.

Вредные примеси в стали включают в себя и кислород, который понижает пластичность металла.

Вредное влияние сегрегации сурьмы (*Sb*) на границах зерен приводит у легированных сталей к отпускной хрупкости.

Поскольку в сталях допускаются небольшие количества примесей, то их влияние на свойства условно как-бы незначительное. Примеси неизбежно присутствуют в сталях, но ряд из них являются вредными, поэтому их содержание стараются минимизировать в процессе выплавки и последующей внепечной обработке.

В современной металлургии наиболее совершенными являются следующие способы выплавки стали в:

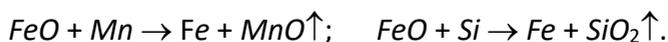
- кислородном конверторе;
- дуговых электрических печах;
- индукционных электрических печах.

Независимо от способа выплавки, процесс выплавки состоит из следующих 4-х периодов:

1. Первый период – расплавление шихты и нагрев жидкой металлической ванны.
2. Второй период – кипение металлической ванны.
3. Третий период – раскисление стали.
4. Четвёртый период – легирование (ввод в металлическую ванну легирующих элементов). Легирующие элементы, сродство к кислороду у которых меньше, чем у железа (*Ni*, *Co*, *Mo*, *Cu*) – при плавке практически не окисляются,

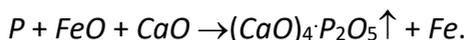
поэтому их можно вводить в любой момент плавки (даже с шихтой), а легирующие элементы, у которых химическое сродство к кислороду больше, чем у железа (*Si, Mn, Al, Cr, V, Ti*), можно вводить лишь в конце процесса плавки или в сталеразливочный ковш.

В первый период после значительного повышения температуры металлической ванны с помощью оксида железа FeO происходит окисление примесей *Mn* и *Si* [4]:



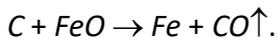
С целью ускорения процесса окисления примесей в этот период в ванну добавляют железную руду или железную окалину.

Одновременно по мере прогрева металла происходит очень важный процесс – дефосфорация металла (уменьшение содержания вредной примеси – фосфора *P*):



Полученный слой шлака счищают с зеркала ванны и добавляют свежие порции известняка $CaCO_3$.

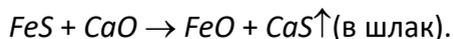
Во второй период – по мере высоких температур и кипения («барботажа») металлической ванны происходит выделение пузырьков окиси углерода (CO) при химической реакции:



Пузырьки CO всплывают вверх, захватывая пузырьки других газов и частицы неметаллических включений (окислов типа MnO , SiO_2 и др.), и выносят их из жидкого металла (газы – в атмосферу, включения – в шлак). За счёт этого сталь

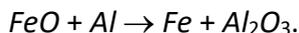
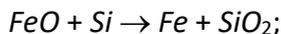
становится более чистой (без кипения она осталась бы очень «загрязнённой»).

Одновременно происходит химическая реакция десульфурации (удаления вредной примеси – серы S):



Соль CaS в жидкой ванне не растворяется, поэтому она всплывает и переходит в шлак.

В третий период происходит раскисление жидкой стали (восстановление окисла железа FeO , растворенного в жидкой стали). Раскисление производится при помощи химических элементов, обладающих большим сродством к кислороду, чем железо по реакциям:



Оксиды MnO , SiO_2 , Al_2O_3 всплывают в шлак. Данный процесс оказывает благоприятное воздействие на свойства стали. За счет дегазации металла кремнием увеличивается ее плотность. Часть химического элемента остается в феррите (твёрдом растворе) уже после раскисления, что приводит к значительному возрастанию предела текучести. Но при этом способность к холодной высадке и вытяжке у стали снижается. По этой причине производители снижают количество кремния в сталях, изготавливаемых для холодной штамповки и высадки. Прочность металла значительно повышается благодаря примеси марганца. Последний сильно уменьшает красноломкость стали, оставляя пластичность практически неизменной. Таким образом, резко падает

хрупкость стали при воздействии высокой температуры, которая возникает из-за присутствия серы.

Случайные примеси (англ. «residual elements», т.е. «остаточные элементы»), к которым, в первую очередь, относятся [4]:

- медь;
- никель;
- мышьяк;
- свинец;
- олово;
- сурьма;
- молибден;
- хром

не удаляются простыми металлургическими процессами, вследствие чего при производстве сталей с повышенным уровнем нормативных требований возникает необходимость учёта их расположения в твёрдом растворе (хром, молибден, никель) или по различным границам, в первую очередь, по границам зерен – это олово, мышьяк и сурьма.

Случайные примеси в стали оказывают на технологические процессы её производства и конечные свойства стальных изделий различно-возможные металлургические влияния:

- молибден, хром и олово влияют на рекристаллизацию и усилия прокатки при производстве горячекатаных стальных лент;
- все случайные примеси оказывают влияние на превращение аустенита в феррит и прокаливаемость стали;

– цинк и олово снижают пластичность при горячей деформации;

– молибден, хром и олово влияют на процесс рекристаллизации при отжиге стали;

– медь, никель, мышьяк и олово неблагоприятно влияют на качество поверхности горячекатаной и травленной стальной полосы из-за усугубления явления красноломкости стали;

– сурьма, олово и мышьяк способствуют охрупчиванию сталей по границам зерен, что особенно касается смотки стальных лент, а также отжига низкоуглеродистых сталей.

Все случайные примеси в стали отрицательно влияют на механические свойства листовой стальной продукции – лент, листов, плит. Хром, медь и никель, молибден отрицательно влияют на свариваемость быстрорежущих сталей.

Случайные примеси в стали могут оказывать неблагоприятное влияние на процессы нанесения металлических покрытий – горячих и электролитических.

Несмотря на то, что влияние случайных примесей на свойства может быть весьма незначительным, иногда даже малое изменение в некоторых свойствах может значительно повлиять на уровень брака стальных изделий с особыми требованиями. Общепринято, что увеличение содержания примесей в стали влияет на различные свойства сталей следующим образом [5]:

– прочность и твердость стали повышаются с увеличением содержания меди, никеля, молибдена олова и сурь-

ма. Хром по-разному влияет на стали: в одних случаях повышает ее, а в других снижает;

- пластичность стали однозначно снижается с увеличением содержания меди, молибдена и олова. Никель и хром могут по-разному влиять на пластические свойства стали;

- степень деформационного упрочнения стали снижается с увеличением содержания всех примесей;

- ударная вязкость стали повышается с увеличением содержания меди и никеля, снижается с увеличением содержания молибдена и олова;

- прокаливаемость стали повышается с увеличением содержания меди, никеля и хрома. Другие примеси или не оказывают влияния на прокаливаемость, или оказывают на нее слабое влияние;

- свариваемость сталей снижается с увеличением содержания всех примесей;

- коррозионная стойкость сталей повышается с увеличением содержания меди, никеля, хрома и олова;

- повышение содержания в стали олова и сурьмы приводит к усугублению отпускной хрупкости стали.

Основным элементом, определяющим механические и технологические свойства стали, является углерод. Всем маркам углеродистой стали соответствуют по регламент-стандартами определенные пределы содержания углерода.

1.1.2. Ликвации, роль и влияние примесей в стали

Жидкое железо способно растворить в себе намного больше любых элементов – легирующих и примесей, чем

твёрдое железо. Сера показывает в этом самый яркий пример. Если жидкое железо при температуре 1000 °С может растворить 31 % серы, то твёрдое железо при той же температуре – только 0,01 %, что означает, что во время кристаллизации стали вся сера будет растворяться в жидкой фазе стали и почти нисколько ее не будет растворяться в твердой фазе: предельная растворимость серы в γ -Fe при 1365 °С составляет 0,05 %, а при 1000 °С почти в 4 раза меньше, 0,013 %; В α -Fe растворимость серы совсем незначительна – при комнатной температуре 0,002–0,003 % [6; 7]. Так, вследствие понижения растворимости во время охлаждения и кристаллизации стали, в т.ч. при её внепечной обработке, сера выделяется в виде неметаллических включений (НВ): сульфидов FeS или окисульфидов $FeS-FeO$ (рисунок 1.1). Сера присутствует в твёрдом железе в виде малых частиц НВ.

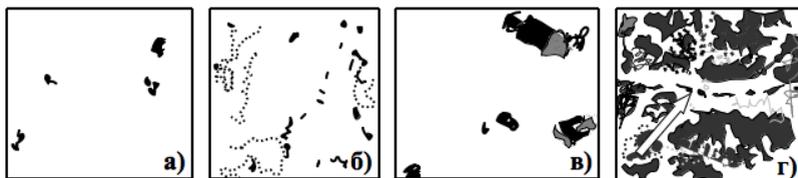


Рисунок 1.1 – Типы неметаллических включений – сульфидов в литой (а – в) и деформированной (г) стали [7]:

а – глобулы окисульфидов $FeS-FeO$; б – цепочки FeS , MnS ; в – Al_2S_3 ; г – цепочки FeS (показаны стрелкой)

Неметаллические включения – это макро- и микро-частицы химических соединений, образовавшихся в стали в процессе её выплавки, доводки, разливки и кристаллизации. Они являются, главным образом, продуктами реакций,

протекающих при раскислении стали, а также образуются при поглощении сталью газов из атмосферы и в результате соприкосновения с кладкой (футеровкой) плавильной печи.

В зависимости от природы происхождения неметаллические включения (НВ) подразделяются на экзогенные и эндогенные.

Экзогенные НВ представляют собой частицы, попавшие в сталь извне. Это кусочки огнеупорной облицовки плавильной печи или сталеразливочного ковша, неудалённые остатки шлака и т. п.

Эндогенные НВ – продукты металлургических окислительно-восстановительных реакций, образующиеся в стали в процессе её выплавки, доводки (раскисления, в основном) и разливки, а также вследствие изменения растворимости примесей при кристаллизации слитка.

Количество НВ в стали зависит от её состава и технологического процесса её выплавки, внепечной доводки и разливки. В отдельных плавках количество НВ может достигать 0,08–0,10 % от массы плавки. Размеры НВ колеблются в широких пределах: от 10^{-5} до 10 мм, но основная масса НВ имеет размеры от 2 мкм до 150 мкм.

В сталях обычного качества содержание серы содержится $\leq 0,04\%$, в качественной – $\leq 0,03\%$, в высококачественной – $\leq 0,02\%$.

Экзогенные включения обычно значительно крупнее эндогенных.

Одна из важнейших металлургических проблем повышения качества стали – изыскание путей снижения её за-

грязнённости неметаллическими включениями. Степень чистоты стали от НВ оценивается средним баллом НВ по шкалам ГОСТ 1778-82 или ASTM E45.

Сульфидные НВ являются химическими соединениями сульфида железа. Сульфид марганца MnS в чистом виде встречается редко. Чаще всего в стали образуются двойные сульфиды марганца и железа $(Fe, Mn)S$. В литой стали сульфиды имеют округлую форму (рисунок 1.2), они непрозрачны и имеют окраску от серо-голубого до светло-серого цвета в зависимости от состава $(Fe, Mn)S$. При пластической деформации сульфиды вытягиваются и на шлифах наблюдаются в виде строчек (см. рисунок 1.1, г).

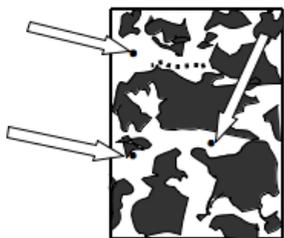


Рисунок 1.2 – Рассредоточенные НВ сульфидов марганца (MnS) в близкой к шаровидной форме (сульфиды марганца MnS отмечены стрелками)

Сульфиды присутствуют в стали не только в самостоятельном виде, но и в комбинациях с окислами. Кристаллизация сульфидов в этом случае происходит на частицах окислов, уже закристаллизовавшихся в жидком металле при более высокой температуре. В этом случае образуются такие, например, комплексные НВ как $FeOMnS$, $FeOSiO_2MnS$ и др.

Марганец, который присутствует во всех сталях, входит в сульфиды и комплексные НВ в количестве, которое

зависит от общего содержания марганца в стали и скорости кристаллизации. После окончания кристаллизации сульфидные частицы распределяются весьма неоднородно. Это явление в русскоязычной технической литературе называется *ликвацией*, а в англоязычной – *микросегрегацией* (microsegregation).

Причиной ликвации являются дендриты, поэтому её нередко так и называют «дендритная ликвация». Схема образования ликвации показана на рисунке 1.3.

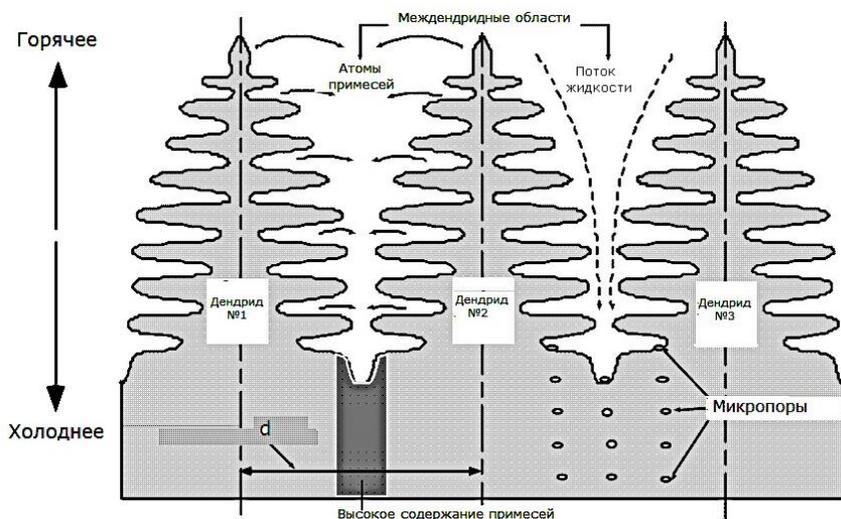


Рисунок 1.3 – Схема движения примесей в междендритные области при кристаллизации стали [6]

Твёрдые дендриты практически не содержат атомов серы, которые выталкиваются из растущих дендритных ветвей в жидкие области между двумя дендритами, как показано стрелками на рисунке 1.3.

Самое большое содержание серы в междендридных областях внизу рисунка 1.3 – у основания дендридов. Когда концентрация серы в железе становится достаточно большой, происходит образование сульфидных частиц. В зависимости от химического состава стали сульфидные включения образуются в жидкости в виде твёрдых частиц или жидких капель, которые затвердевают позже при температурах, которые ниже температуры затвердевания основания дендридов. Таким образом, все сульфидные частицы располагаются в междендридных областях, которые указаны на рисунке 1.3 как зоны с высокой концентрацией примесей.

Влияние ликвации на структуру стали

Марганец, углерод и легирующие элементы, которые намеренно добавляют в железо при приготовлении стали, также сегрегируют в области между дендридами литой стали. Явление ликвации-микросегрегации может приводить к образованию в аустените частиц, которых казалось бы не должно быть согласно фазовой диаграмме железо–углерод ($Fe-C$). Марганец и некоторые из легирующих элементов, такие как молибден и хром, являются сильными карбидообразующими элементами. Цементитные карбидные частицы в этом случае принимают вид $(FeX)_3C$, где X – это комбинация марганца, молибдена и хрома. Чтобы растворить эти карбидные частицы, диффундировать должны атомы элемента X , а также атомы углерода. Однако эти элементы диффундируют в тысячи раз медленнее, чем углерод. Этим и объясняется то, что обычно кристаллизация низколегиро-

ванных, инструментальных и нержавеющей сталей происходит как неравновесная кристаллизация с соответствующими последствиями влияния на формирование структуры стали и её свойства.

Неравномерное распределение компонентов сплава и НВ в отливке в период затвердевания называется, как указывалось ранее, ликвацией или сегрегацией. Неоднородность химического состава стального слитка, в частности, может быть двоякого характера:

- **микроскопическая неоднородность;**
- **зональная неоднородность** (макроскопическая).

Кристаллы, образующиеся в самом начале процесса затвердевания сплава, очевидно, будут состоять из наиболее тугоплавкого материала, более легкоплавкий материал займет пространство между ранее образовавшимися кристаллами. Очевидно, что скоплений сравнительно легкоплавкого материала будет больше там, где затвердевание заканчивается в последнюю очередь, т.е. в местах стыка растущих кристаллов (межкристаллитная ликвация), а внутри отдельных кристаллов – дендритов – в междоусных пространствах (внутрикристаллитная ликвация) [8].

В итоге, в междоусных пространствах внутри зерен и на границах между зернами будут скопляться легкоплавкие сернистые и фосфористые соединения железа, газы и пр. Наличие подобного рода микроскопической ликвации ослабляет сцепление между зернами стали и понижает, следовательно, механические качества слитка.

Образование зональной ликвации можно представить себе следующим образом: затвердевание слитка начинается от стенок изложницы и по этой причине внешние слои слитка, затвердевающие первыми, будут содержать меньше элементов, понижающих температуру плавления сплава (углерод, сера, фосфор и др.), а части слитка, затвердевающие последними – сердцевина (центральная часть слитка) и верхняя часть слитка, обычно содержат большое количество этих элементов. На рисунке 1.4 представлен разрез слитка, протравленный серной кислотой. Сердцевина слитка сильно разъедена реактивом, что объясняется большим количеством в её составе НВ серы, фосфора, углерода и газов.



На рисунке 1.4 представлен разрез слитка, протравленный серной кислотой. Сердцевина слитка сильно разъедена реактивом, что объясняется большим количеством в её составе НВ серы, фосфора, углерода и газов.

Наиболее многочисленными, причём в подавляющем большинстве, НВ группы окислов, являющиеся продуктами раскисления стали – простые и сложные окислы, а также силикаты и алюмосиликаты.

Рисунок 1.4 – Разрез слитка [8]

Различают три вида включений группы окислов (оксидных включений):

1. Простые окислы: FeO – закись железа, Fe_2O_3 – окись железа, SiO_2 – двуокись кремния (кремнезём), Al_2O_3 – окись алюминия (глинозём), Cr_2O_3 – окись хрома и др.

2. Сложные окислы (шпинели): $FeOMnO$ – закись железа и марганца, $FeOCr_2O_3$ – хромиты, $FeOAl_2O_3$ – железная шпинель и др.

3. Силикаты и алюмосиликаты: $2FeOSiO_2$ – силикат железа, $2MnOSiO_2$ – силикат марганца, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ – алюмосиликат.

Обычно содержание оксидных НВ в стали составляет 0,01–0,03 %. В их состав входит 60–90 % Al_2O_3 , 2–30 % SiO_2 , 1–10 % MnO и, кроме того, Cr_2O_3 , MgO и др.

Оксидные включения находятся в твёрдой стали в виде соединений разных оксидов: кемнезёма, силикатов, шпинелей и др.

В виде чистого оксида часто встречается только корунд (рисунок 1.5), который является α -модификацией глинозёма Al_2O_3 , а именно – α - Al_2O_3 , имеющего высокую твёрдость, при обработке давлением не деформируется. В отражённом свете под микроскопом кристаллы корунда обычно наблюдаются в виде отдельных дезориентированных кристаллов неопределённой формы или шестиугольников, чаще неправильной формы (рисунок 1.5, б). В подвергнутой пластической деформации стали эти включения вытягиваются, образуя строчки (рисунок 1.5, а).

Кроме корунда, в стали, раскисленной алюминием, наблюдаются включения шпинели на основе Al_2O_3 (ри-

сунк 1.6). Наиболее часто встречаются НВ железной шпинели – герцинита ($FeO-Al_2O_3$) и марганцевой шпинели – галаксита ($MnO-Al_2O_3$), образующих непрерывный ряд твёрдых растворов, а также включения систем $Fe-Al_2O_3$ и $MnO-Al_2O_3$. Эти включения на металлографических шлифах имеют вид прямоугольных кристаллов правильной кубической формы (рисунок 1.6, а) или треугольников.

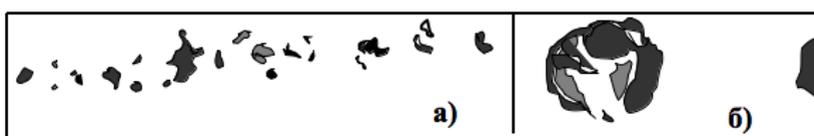


Рисунок 1.5 – Включения корунда в стали (x100) [7]:

а – строчечные включения; б – включения гексагональной формы

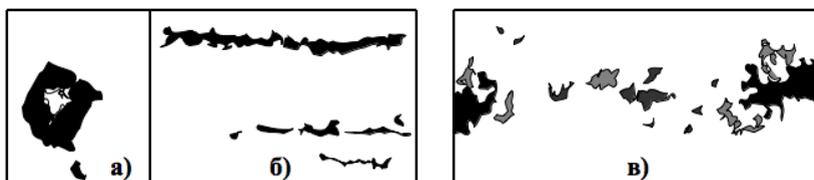


Рисунок 1.6 – Включения марганцевой шпинели – галаксита $MnO-Al_2O_3$ (а, б) и алюмосиликатов с кристаллическим корундом (в) [7]:

а – отдельное включение, x1500; б – строчечное расположение включений, x400; в – строчечное расположение соединения алюмосиликатов с кристаллическим корундом, x800

Включения $Fe-Al_2O_3$ и $MnO-Al_2O_3$ на металлографических шлифах часто располагаются отдельными гроздьями, которые при прокатке и ковке вытягиваются в строчки (рисунок 1.6, б), при этом сами кристаллы герцинита и га-

лаксите, имея высокую твёрдость, пластической деформации не подвергаются, а изменяется лишь их взаимное расположение. Встречаются и другие шпинели на основе алюминия, например, магнезиальная шпинель ($MgO-Al_2O_3$). Нередко корунд располагается в соединениях с алюмосиликатами (рисунок 1.6, в).

Выделяющийся при раскислении стали кремнием кремнезём (SiO_2) в виде самостоятельных включений встречается в стали редко, обычно он образует с другими оксидами силикаты, которые представляют достаточно большую группу НВ. Включения силикатов имеют сложный состав из-за растворения ими других оксидов, сульфидов и т. п., с которыми они образуют различные соединения и механические смеси. В стали эти НВ имеют вид сложных конгломератов, в которых можно различить ряд минералов. Наиболее часто в стали встречаются НВ силикатов железа (фаялит $2FeO-SiO_2$) и марганца (тефроит $2MnSiO_2$, роданит $MnOSiO_2$). Они имеют вид глобулей с кристаллами других минералов на поверхности (рисунок 1.7, а); иногда располагаются в виде сложных скоплений (рисунок 1.7, б).

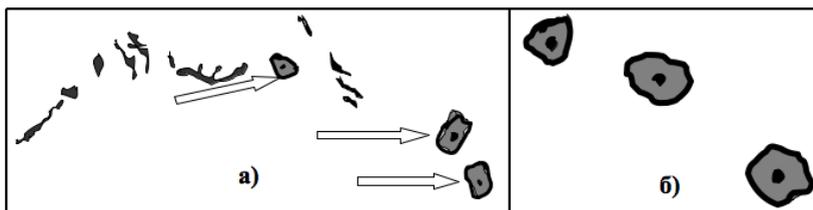


Рисунок 1.7 – Крупные включения TiN (а) отмечены стрелками) и мелкие НВ, содержащие Ti , C , S и небольшое количество азота N , выделившееся по границам зёрен [7]

При температурах горячей обработки давлением эти НВ пластичны и в процессе пластической деформации вытягиваются. Часто встречаются также НВ алюмосиликатов, в частности, муллита ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) и силлиманита ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) ромбической и овальной формы, которые располагаются преимущественно группами, часто с кристаллическим корундом (рисунок 1.7, в). Эти НВ не пластичны и не деформируются.

В легированных сталях в зависимости от содержания тех или иных элементов в состав НВ могут входить оксиды *Cr*, *Ti*, *V* и др. В сталях, легированных хромом, встречаются хромиты $FeO \cdot Cr_2O_3$, отличающиеся высокой твёрдостью и не деформирующиеся. На шлифах они имеют прямоугольный или треугольный вид светлосерого цвета, непрозрачны.

Азот может растворяться в стали, образуя твёрдый раствор внедрения, и способствовать созданию химических соединений – нитридов. Наибольшим к азоту сродством обладают такие элементы, как *Ti*, *Al*, *Zn* и *Nb*, образуя соответственно нитриды *TiN*, *AlN*, *ZnN*, *NbN*. Среди других НВ нитриды хорошо распознаются под микроскопом по правильной огранке, они непрозрачны и отличаются металлическим блеском, при деформировании не изменяют своей формы. В литой стали нитриды располагаются дезориентированно (рисунок 1.8), а в деформированной – в виде цепочек. На рисунке 1.8 показаны нитриды в литой стали, которые выглядят как тёмные черточки, распределённые неравномерно в феррите. Вместе с тем азот формирует возле перлита сплошные полосы цементита Fe_3C . В

сталих, содержащих Ti , могут образовываться карбонитриды титана. Они отличаются от TiN более округлой формой и окрашены в яркий розовый цвет.

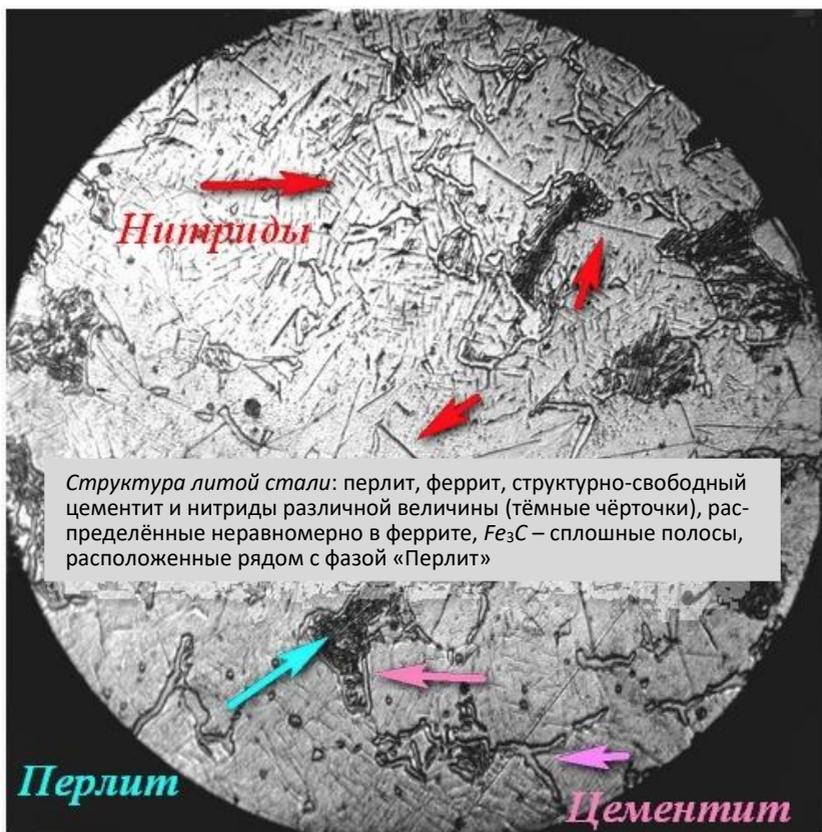


Рисунок 1.8 – нитриды в структуре литой стали (x200) [9]

На рисунке 1.9 показана структура хромомарганцевой стали (0,7 N , 0,03 C , 15 Mn , 21,5 Cr) – с нитридом хрома Cr_2N , обедненным хромом аустенитом и межзеренными

выделения $Cr_{23}C_6$. Повторный нагрев вызывает ячеистое выделение нитрида хрома Cr_2N по границам зерен.

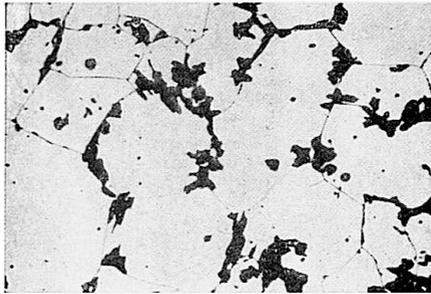


Рисунок 1.9 – Выделения нитрида хрома [9]

На рисунке 1.10 показаны зернистые выделения нитрида алюминия AlN (темная фаза) в стали с содержанием 0,2 % Al и 0,045 % C .

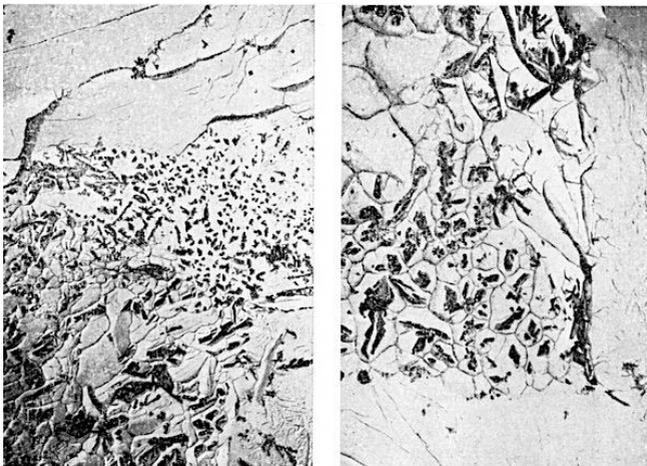


Рисунок 1.10 – Выделения нитрида алюминия [9]

1.2. Влияние неметаллических включений на свойства стали и методы их количественной оценки

Все НВ оказывают отрицательное влияние на механические и технологические свойства стали. Влияние это является следствием нарушения однородного напряжённого состояния металла и концентрации напряжений вокруг НВ, выполняющих роль надрезов, особенно остроугольной и удлинённой формы. Концентрации напряжений вокруг НВ однозначно вызывает ухудшение механических и технологических свойств стали.

Наиболее сильно НВ влияют на ударную вязкость, которая особенно чувствительна к надрезам металла и концентраторам напряжений. Понижение ударной вязкости может достигать 70 % при наличии строчечных включений (см. например рисунки 1.5, а и 1.6 б, в).

Нарушая однородность металла, НВ являются также препятствиями для движения дислокаций при пластической деформации. Вследствие этого возрастает вероятность хрупкого разрушения металла. Расчёты критического диаметра $d_{кр}$ НВ по формуле:

$$d_{кр} = g \cdot K_{1C} / 2\sigma_T, \quad (1)$$

где K_{1C} – критерий хрупкого разрушения; σ_T – предел текучести стали; g – коэффициент концентрации напряжений вокруг НВ,

показывают, что для высокопрочных сталей $d_{кр} \approx 2$ мм, т.е. хрупкое разрушение могут вызвать лишь крупные экзогенные НВ, попавшие в сталь извне.

В развитии вязкого разрушения НВ играют инициирующую роль. Наибольшие напряжения и наивысшая вероятность возникновения трещин создаются около прочных

недеформируемых НВ типа Al_2O_3 , SiO_2 , силлиманита ($Al_2O_3SiO_2$) и муллита ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), имеющих высокий модуль упругости, т.е. концентрация напряжений зависит от упругих свойств НВ.

Возникновение трещины происходит по поверхности раздела НВ и матрицы, а при высокой хрупкости НВ трещина образуется и в самом НВ. Образующиеся около отдельных частиц НВ микрополости и микротрещины, распространяясь в процессе пластической деформации от одной частицы к другой, сливаются и образуют магистральную трещину, разрушающую металл.

Отрицательное влияние НВ на свойства стали зависит как от их количества, так и их формы, размеров, характера расположения и свойств, прежде всего упругих. Количество НВ оценивают с помощью специальных эталонных шкал (рисунок 1.11) при использовании стандартов SEP 1570–71, ASTM E45 или ГОСТ 1178–79. С увеличением числа различных марок сталей и областей их применения становится всё труднее использовать эталонные шкалы для количественной оценки чистоты стали, тем не менее пользоваться эталонными шкалами удобно, особенно с помощью автоматических анализаторов изображений типа «Квантимет 720» и «Эпиквант».

Свойства стали зависят не только от количества НВ, но и от их расположения. Из двух схем расположения НВ (рисунок 1.12) вторая (рисунок 1.12, б) явно более опасна с позиции ухудшения свойств стали, особенно в направлении, перпендикулярном толщине из-за возможности обра-

зования расслоений. Площадь НВ в обоих случаях идентична, а распределение – различное.

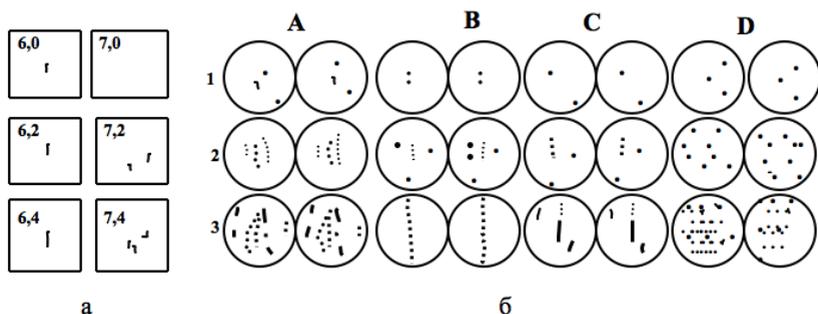


Рисунок 1.11 – Вид эталонной шкалы НВ (фрагмент) [7]:
 а – Евростандарт SEP1570–71, вертикальные ряды 6 и 7 для прибора «Квантимет 720» и б – для стандарта ASTM E45 (США)

Расположенные по границам зёрен в виде плёнок или вытянутыми при пластической деформации в цепочки НВ (см., например, рисунок 1.6, б и в) резко ослабляют межкристаллитную связь, снижая прочность и пластичность стали. Только включения округлой формы, беспорядочно расположенные внутри зёрен, оказывают минимальное влияние на механические свойства стали.

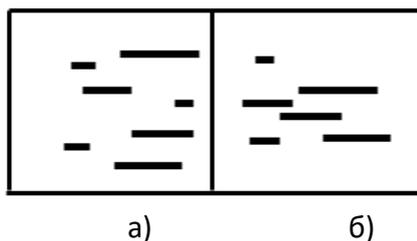


Рисунок 1.12 – Схемы НВ с одинаковыми количественными характеристиками, но разным их распределением [7]:

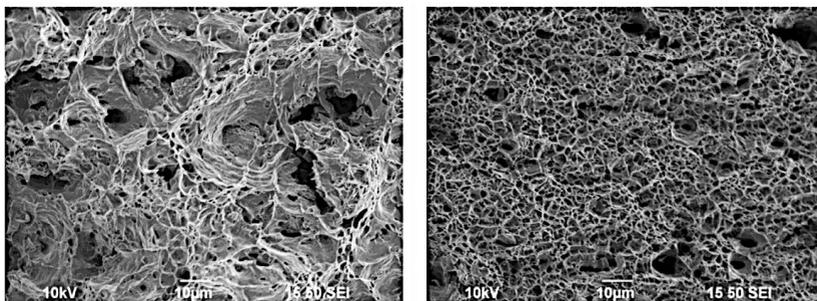
а – рассредоточенным по площади и б – сконцентрированным (локализованным) в одном месте

У стали, подвергнутой пластической деформации, НВ усиливают анизотропию механических свойств, которая проявляется в их различии в разных направлениях. Так показатели пластичности (относительное сужение φ и относительное удлинение δ) в направлении поперёк проката могут быть в 1,5–3 раза ниже, чем в продольном направлении.

Решающее влияние оказывают НВ на работоспособность трущихся поверхностей: шарикоподшипников, зубьев шестерен и т. д. Они могут стать очагом усталостного разрушения, начинающегося с возникновения трещин в местах их расположения.

Оценить роль НВ в разрушении металла, определить характер и выявить причину разрушения стали позволяют исследования поверхности разрушенных образцов с помощью растрового электронного микроскопа. Фазовый состав НВ определяют металлографическим, петрографическим или рентгеноструктурным методами, а химический состав – химическим анализом выделенных в осадок НВ или локальным рентгеноструктурным методом.

Для вязкого излома стали характерно наличие на его поверхности «ямок», внутри которых наблюдаются частицы НВ. Ямочная структура является признаком вязкого излома (рисунок 1.13). Ямки на поверхности разрушения (рисунок 1.14) образуются путем слияния микропор. Часто на «дне» ямки находится НВ, которое привело к её образованию. Размер ямок зависит от размера и количества частиц НВ, которые в данном материале инициируют разрушение.



а

б

Рисунок 1.13 – Фрактограммы углеродистой стали 20 (а) и легированной стали 09Г2 (б) [10]:

а – сталь 20 с крупным ямочным микрорельефом;

б – сталь 09Г2 с мелким ямочным микрорельефом

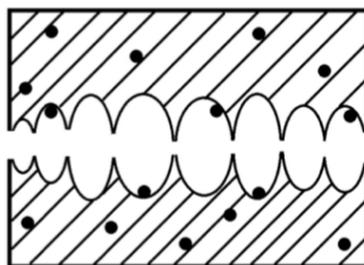


Рисунок 1.14 – Схематическое изображение ямок в изломе [10]

Очаги разрушения, полости, зарождающиеся на границе раздела между металлом и НВ, под действием преимущественно растягивающих напряжений растут, расширяясь вплоть до слиянии друг с другом, и создают на поверхности разрушения микрорельеф в виде «ямок».

Хрупкое разрушение происходит путём образования и распространения трещин скола по определённым кристаллографическим плоскостям. На микрофрактограммах хрупкого излома видны фasetки скола, поверхность кото-

рых свидетельствует о том, что НВ в разрушении не участвуют (рисунок 1.15, а). Исключения составляют крупные экзогенные включения или скопления НВ (карбидов) по границам зёрен. В последнем случае происходит хрупкое межзёрненное разрушение (рисунок 1.15, б).

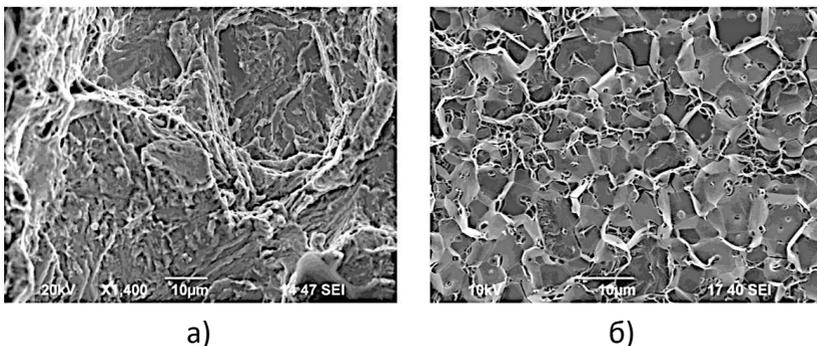


Рисунок 1.15 – Фасетки скола в образце из стали 30 со структурой мартенсит отпуска (а) и межзёрненные фасетки в ударном образце из сплава ВНЖК (б) [10]

Снижение загрязнённости металла НВ, уменьшение их размеров, более благоприятное распределение достигается применением специальных и дополнительных приёмов металлургической обработки стали: внепечной обработки (продувки инертным газом, вакуумирования, комплексного модифицирования с использованием жидкого синтетического шлака и пр.), применением переплава – электрошлакового (ЭШП), вакуумно-дугового (ВДП) и электронно-лучевого (ЭЛП).

Осуществляемые в вакууме ВДП и ЭЛП приводят к снижению содержания газов (O , N) в стали, а, следовательно, к уменьшению оксидов и нитридов в ней. ЭШП и вне-

печная обработка обеспечивают снижение содержания серы, в частности, вследствие чего уменьшается содержание сульфидов в стали (таблица 1.1). Важными с позиций минимизации содержания НВ в стали являются также операции её разливки в слитки или непрерывнолитые заготовки, такие как защита струи металла между сталеразливочным и промежуточным ковшами, защита зеркала металла изолирующей смесью, разливка при помощи погружных стаканов и т. д.

Таблица 1 – Содержание НВ (в объёмных %) в сталях при использовании различных способов выплавки

Способ выплавки	Всего НВ: объёмный % / по отношению к открытой дуговой плавке (ОД)	В том числе:		
		окислы	сульфиды	нитриды
ОД	0,0230 / 1,0	0,0157 / 1,0	0,0053 / 1,0	0,0020 / 1,0
ЭШП	0,0070 / 3,3	0,0055 / 2,9	0,0009 / 5,9	0,0006 / 3,3
ВДП	0,0059 / 3,9	0,0034 / 4,6	0,0017 / 3,1	0,0008 / 2,5
ЭЛП	0,0048 / 4,8	0,0020 / 7,85	0,0011 / 4,8	0,0007 / 2,85

1.3. Влияние редкоземельных и щелочноземельных металлов на неметаллические включения

На заключительной стадии рафинирования (очистки) стали могут применяться редкоземельные и щелочноземельные металлы (РЗМ и ЩЗМ), такие как *Ca, Mg, Ce, La* и др., обладающие наиболее сильным сродством к растворённому в жидкой стали кислороду и сере. РЗМ и ЩЗМ обеспечивают трансформацию НВ, например, сфероидизируют скопления корунда, регулируют состав и морфологию НВ, что благоприятно сказывается на физико-механических и иных свойствах стали.

РЗМ в жидком железе полностью растворимы, а в твёрдом железе их растворимость, напротив, мала.

При взаимодействии РЗМ с расплавами сталей в первую очередь образуются окислы, а затем окисульфиды и сульфиды. Продукты этих реакций из-за высокой температуры плавления находятся в твердом состоянии. Характерным для соединений РЗМ – окислов и сульфидов – является высокая тугоплавкость. При раскислении кремнием и РЗМ включения в стали представляют оксиды, окисульфиды и сульфиды РЗМ: $\text{РЗМ}_2\text{О}$ (La_2O_3 , Ce_2O_3 , Pr_2O_3 , Nd_2O_3), $\text{РЗМ}_2\text{O}_2\text{S}$ ($\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$, $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$, $\text{Pr}_2\text{O}_2\text{S}$, $\text{Nd}_2\text{O}_2\text{S}$) и сульфиды РЗМ – LaS , La_2S_3 , CeS , Ce_2S_3 , Pr_2S_3 , NdS и Nd_2S_3 . Подобно включениям глинозема оксиды, окисульфиды и сульфиды РЗМ образуют локальные скопления в готовой стали [11].

Усвоение РЗМ зависит от способа присадки (введения) в изложницу или сталеразливочный ковш. Введение аргона в закрытую изложницу позволяет ограничить доступ кислорода и усвоение РЗМ при этом способе введения составляет от 60 % до 80 % [11–12].

Влияние на свойства стали ЩЗМ – кальция (Ca), магния (Mg), бериллия (Be), бария (Ba), стронция (Sr) и модификатора на основе ЩЗМ (кальций-стронциевого карбоната (Ca , Sr) CO_3 (КСК)), а также использования РЗМ в чёрной металлургии России и мира отражено в публикациях [13–14 и др.]. В таблице 1.2 даны физические свойства ЩЗМ [20–22].

Кальций является одним из наиболее активных химических элементов ЩЗМ и эффективно взаимодействует с кислородом, серой, азотом, водородом и др. элементами.

Среди прочих его достоинств – удаление мышьяка, свинца, олова. В настоящее время это наиболее часто используемый модификатор. Кальций имеет ограниченную растворимость в жидком железе и стали, при температуре сталеплавильных процессов высокое сродство к кислороду и активно взаимодействует с футеровкой ковша и шлаком. Поэтому ввод лигатур производится не в сталеразливочный ковш. Кальций повышает температуру плавления сульфидной фазы, и соединения, содержащие серу, образуются в жидком металле. При этом возникает возможность удаления околосульфидных включений из расплава.

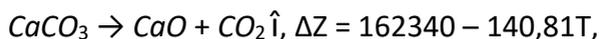
Таблица 1.2

Физические свойства щелочноземельных металлов [1–3]

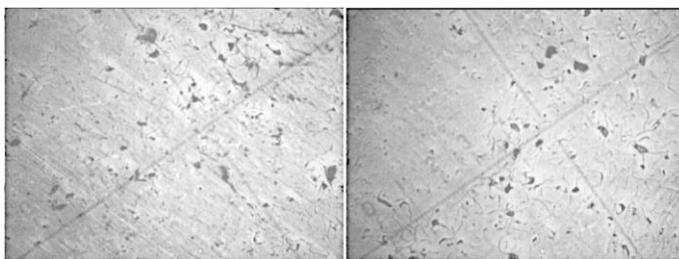
Параметры измерения	Лит. ист.	Наименование элемента			
		Mg	Ca	Sr	Ba
Атомный радиус, нм	1	0,162	0,197	0,215	0,221
Температура плавления, 0С	1	650	848	769	725
Температура кипения, 0С	1	1107	1487	1384	1637
Давление насыщенного пара при 1873 К, МПа	2	2,044	0,1863	0,4164	0,05171
Растворимость в жидком железе в равновесии с насыщенным паром, масс.%	2	1,016	$4,022 \cdot 10^{-2}$	$2,408 \cdot 10^{-3}$	$2,791 \cdot 10^{-4}$
Относительная модифицирующая способность	3	-	$77,88 \cdot 10^2$	$39,7 \cdot 10^4$	$69,86 \cdot 10^5$

Введение кальция в расплав ЦЗМ может частично трансформировать корундные включения во включения алюминатов кальция. Эта трансформация зависит от количества введенного кальция. Роль кальция при введении его в металл сводится не только к изменению включений и обеспечения контроля формы НВ, но и к возможности влияния на свойства стали явления, связанные с межкристаллитной адсорбцией. Этот элемент обогащает границы

зерен, препятствуя образованию в межкристаллитных соединениях, охрупчивающих металл выделений. Кальций препятствует сегрегации в межкристаллитных зонах марганца, титана и азота, что препятствует образованию карбонитридов и сульфидов, охрупчивающих сталь. Результаты модифицирования и микролегирования расплава чугуна модификаторами на основе карбонатов кальция, бария и стронция свидетельствуют о заметном влиянии их на конечную микроструктуру отливок (рисунок 1.16) из-за того, что происходит реакция диссоциации. Например, при использовании карбоната кальция $CaCO_3$ в жидком металле происходит термическая диссоциация с образованием большого количества рафинирующих высокодисперсных газовых пузырьков CO_2 . Диссоциация карбоната кальция $CaCO_3$ идёт по реакции:



где ΔZ – изменение изобарно-изотермического потенциала; Дж/моль; T – температура, К.



а)

б)

Рисунок 1.16 – Влияние карбоната кальция $CaCO_3$ на микроструктуру отливок [18]:

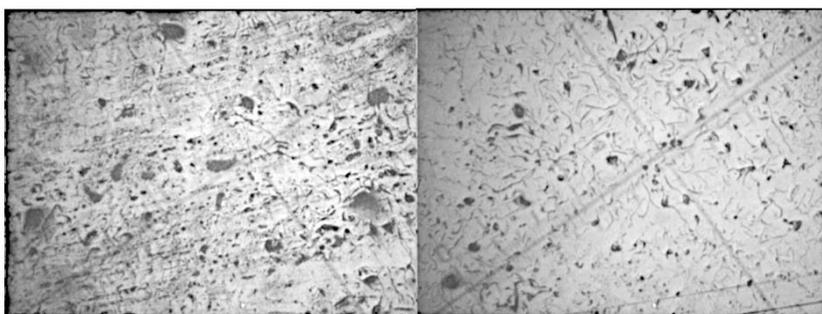
а – до модифицирования; б – после модифицирования

Магний как активный химический элемент ЦЗМ в роли комплекс-модификатора в количестве от 10 мас. % до 15 мас. % обеспечивает глубокую десульфурацию и модифицирование сульфидных, оксидных, нитридных, фосфидных и силикатных неметаллических включений, а также повышает раскислительную способность модификатора. Содержание магния в модификаторе < 10 мас. % не обеспечивает интенсивное раскисление металла, его глубокую десульфурацию, снижает модифицирующие свойства и ухудшает качество стали. Повышение содержания магния в модификаторе > 15 мас. % нецелесообразно, потому что, учитывая высокую упругость пара магния при температурах внепечной обработки и при наличии других высокоактивных элементов кальция и бария, может произойти удаление избыточного магния в газовую фазу.

ЦЗМ бериллий (*Be*), в основном, используют как легирующую добавку к различным сплавам. Добавка бериллия значительно повышает твёрдость и прочность сплавов, коррозионную устойчивость поверхностей изготовленных из этих сплавов изделий. Добавка 0,5 % бериллия в сталь позволяет изготавливать пружины, которые способны пружинить при красном калении, т.е. *Be* способствует модификации такого свойства конструкционного материала.

Малая растворимость ЦЗМ бария (*Ba*) в железе, невысокое давление его паров в зоне раствора лигатур, низкая температура плавления приводят к более раннему и эффективному реагированию бария с кислородом и серой, последующему спонтанному удалению продуктов реакции.

В реальных условиях заливка модифицированной барием стали в литейные формы сопровождается повышением её жидкотекучести с одновременным уменьшением сил взаимодействия между жидким металлом и материалом формы. Отмечается снижение пригара, количества дефектов и улучшение качества поверхности отливок. Помимо всего прочего, барий оказывает модифицирующее влияние на НВ, ускоряя их всплывание. Механические свойства стали (предел усталости, ударная вязкость) и их изотропность заметно улучшаются [15–17]. Отмечается положительное влияние *Va* на микроструктуру низколегированной стали после отжига (рисунок 1.17) [18].



а)

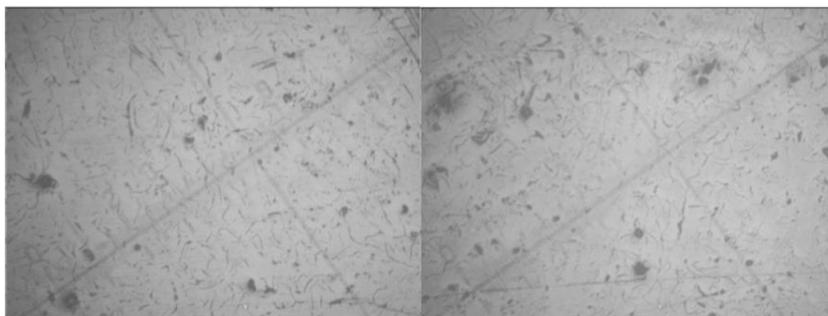
б)

Рисунок 1.17 – Влияние карбоната бария $BaCO_3$ на микроструктуру отливок [18]:

а – до модифицирования; б – после модифицирования

ЩЗМ стронций (*Sr*) по своим физическим характеристикам занимает промежуточное положение между кальцием и барием. Стронций по сродству к кислородку приближается к РЗМ. Теплота образования оксидов и сульфидов

дов стронция близка по своему абсолютному значению. Для эффективного использования стронция в практической реализации необходимы приёмы, обеспечивающие контакт паров стронция с металлом в определенный промежуток времени. Сульфиды стронция $SrCO_3$ при обработке стали лигатурами, содержащими стронций (преимущественно около 70 %), разлагаются в осях дендритов. Это связано с тем, что сульфиды ЩЗМ являются подложками при кристаллизации металла, от которых растут оси дендритов. Вследствие этого при модифицировании как правило удастся достичь индекса загрязненности стали при строго определенном количестве модифицирующих добавок с определённым влиянием на микроструктуру чугунных отливок, в частности (рисунок 1.18) [18].



а)

б)

Рисунок 1.18 – Влияние карбоната стронция $SrCO_3$ на микроструктуру отливок:

а – до модифицирования; б – после модифицирования

Модификатор кальций-стронциевый карбонат (КСК) на основе ЩЗМ для стали представляет собой высокодисперсный порошок со средним содержанием $SrCO_3$ до 8 %

предназначен для рафинирующей внепечной обработки чугунов, сталей и цветных сплавов. Он обладает мощным модифицирующим эффектом при использовании расхода величиной 4–6 кг на одну тонну жидкого металла. Введение в расплав сталей КСК сопровождается интенсивным перемешиванием металла вследствие выделения пузырьков CO_2 . Это усиливает эффект рафинирования расплава от неметаллических включений и газов, особенно водорода, а также усредняет расплавы по температуре и химическому составу.

При модифицирующей обработке связывается сера в сульфиды стронция (SrS). Их размеры становятся меньше, а форма приближается к глобулярной. Существенно уменьшаются выделения сульфидов по границам зерен. Основное отличие модифицированного материала заключается в том, что он получен физико-химическим путём.

Специально подобранный гранулометрический состав создает оптимальный газовый режим и обеспечивает ярко выраженный классический адсорбционно-флотационный механизм рафинирования.

Процесс рафинирования смесью КСК экологически чистый.

В результате рафинирования у металла повышается уровень механических свойств, особенно ударной вязкости. Увеличивается жидкотекучесть расплава. Преимуществом материала также является одновременное рафинирующее и модифицирующие действия за счет соединений стронция.

Обработка чугунов КСК повышает их износостойкость. Максимальная износостойкость наблюдается при добавлении карбоната до 3 кг/т для стали ИЧХ28Н2, а для ИЧ300Х16Ф8 до 5 кг/т. Это можно объяснить тем, что при таком количестве КСК он действует как добавка, рафинирующая и модифицирующая чугун.

Полностью избавиться от неметаллических включений (НВ) не представляется возможным, однако задача формирования наименее «вредных» НВ, в минимальной степени влияющих на снижение показателей качества готовой продукции вполне выполнима. В образовании таких НВ определяющую роль играют ЩЗМ. Присадка этих металлов в жидкую сталь может быть хорошей альтернативой дорогостоящим мероприятиям по снижению общего содержания НВ с помощью проведения длительной внепечной обработки расплава. Другими словами, большую пользу могут принести усилия, направленные на регулирование состава и морфологии включений путём их модифицирования. Получение металлоизделий высокого качества значительно облегчается при использовании многокомпонентных комплексных сплавов, содержащих кальций, барий, стронций и другие химически активные элементы.

Применение комплексных модификаторов системы *Ca-Ba-Sr* для обработки стали для труб марок 22–25ГЮ позволяет снизить загрязнённость металла по среднему баллу хрупкими силикатами с 1,83 до 1,67, по сульфидам – с 1,25–1,33 до 0,58 и отбраковку металла по трещинам, образующихся при сварке труб. На стали 40С2 удалось исключить

брак по микроструктуре. Известно [20], что чем меньше растворимость элемента в железе, тем при меньшей его концентрации может проявиться модифицирующий эффект. Применение комплексных микрокристаллических модификаторов с кальцием и барием в сталелитейном производстве надрессорных балок, например, позволило повысить ударную вязкость при испытании образцов с острым надрезом (KCV-60) на 49,7 % (таблица 1.3), а введение в сплав со-модификаторов стронцием приводило к дальнейшему повышению ударной вязкости на 9,4 % [19].

Таблица 1.3
Результаты сравнительных испытаний модификаторов [19]

Тип модификатора	Содержание кальция в металле, ppm	Ударная вязкость, KCV ⁶⁰ , кДж/м ²
FeCa	16,7	177
Fe-Si-Ca-Ba	17,1	265
Fe-Si-Ca-Ba-Sr	19,8	290

Рост ударной вязкости при испытании образцов с острым надрезом (KCV-60) можно объяснить действием ряда факторов [19]:

- высокой поверхностной активностью бария и стронция в металлическом расплаве;
- зародышевой ролью образующихся содержащих ЦЗМ соединений, например, тугоплавких сернистых соединений кальция, стронция и бария, которые могут играть роль подложек, уменьшающих работу образования зародыша твердой фазы, а также инициирующих кристаллизацию стали и

приводящих к перераспределению включений в дендритной структуре в сторону увеличения их количества в осях;

– глубоким раскислением стали вследствие благоприятных условий образования и удаления из металлического расплава оксидных соединений, содержащих барий и стронций.

Исследование НВ проведено на подготовленном металлографическом шлифе с применением сканирующего электронного микроскопа «Tescan Vega» (рисунок 1.19), оснащенного рентгеновским энергодисперсионным спектрометром INCA X-Max-50 с возможностью эффективного аналитического решения для проведения регулярного контроля качества материалов на микроуровне. Используемый метод позволяет визуализировать структуру исследуемого объекта и по рентгеновскому спектру осуществить локальный элементный анализ структурных составляющих с разрешением порядка 1 мкм (рисунок 1.20) [19].



Рисунок 1.19 – Сканирующий электронный микроскоп «Tescan Vega» [21]

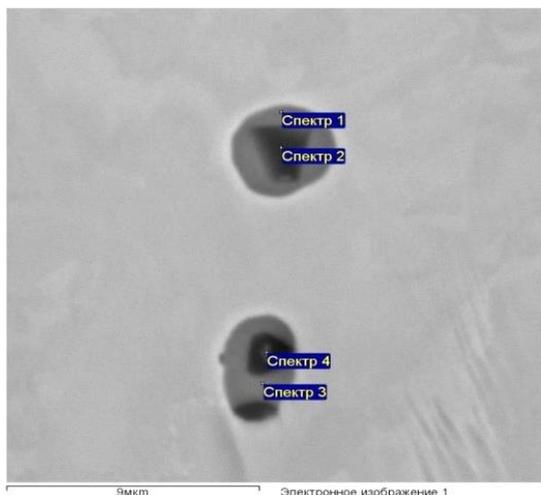


Рисунок 1.20 – Структура неметаллических включений, содержащих стронций [19]

Центральная часть НВ представляет собой оксиды алюминия (спектр 3 – таблица 1.4), периферийная – сульфиды марганца и кальция, в отдельных неметаллических включениях в зоне локализации сульфидов обнаружено присутствие стронция с максимально локальным содержанием до 7,4 % масс. (спектр 1) [19].

Таблица 1.4
Состав структур неметаллических включений, содержащих стронций [19]

Спектр	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe	Sr
Спектр 1	7,1	2,4	9,9	1,1	19,8	18,5	3,7	30,2	7,4
Спектр 2	26,1	19,6	26,8	0,4	2,9	3,1	2,2	27,7	1,2
Спектр 3	7,4	2,5	10,4	1,8	13,8	13,0	3,6	41,7	5,7
Спектр 4	40,6	11,0	30,6	0,4	1,8	3,0	2,4	9,9	0,2

Таким образом, стронций и барий не только участвуют в раскислении и модифицировании стали, но вследствие их повышенной реакционной способности обеспечивают защиту кальция, причём в этом отношении наиболее эффективен, по-видимому, стронций, поскольку он обладает в газообразном состоянии большой контактной поверхностью с жидким металлом. Значительное повышение ударной вязкости стали при использовании сплава *Fe-Si-Ca-Ba-Sr* (см. таблицу 1.3) позволяет предположить, что наряду с раскислением кальций играет роль микролегирующего элемента [19].

Положительный эффект обработки стали комплексными сплавами с кальцием, барием и стронцием, заключающийся в повышении ударной вязкости литого металла (балки надрессорные, в частности) на 63,8 % при рафинировании и модифицировании стали транспортного назначения комплексными сплавами системы *Fe-Si-Ca-Ba*, *Fe-Si-Ca-Ba-Sr* и механических характеристик стали вследствие снижения количества в ней НВ за счёт благоприятных условий удаления из металлического расплава бария и стронций содержащих оксидных соединений в итоге объясняется глубоким раскислением стали, благоприятными условиями образования и удаления из металлического расплава соединений оксидов, а также упрочняющим воздействием кальция на кристаллизующийся металл [19; 22].

Модификатор барий-стронциевый карбонат с повышенным содержанием бария и стронция (БСК-2), содержащий активные элементы – барий и стронций (таблица 1.5),

способных образовывать более устойчивые соединения с серой и фосфором, позволяет выводить их из металла в шлак, т.е. барий и стронций в карбонатной форме могут работать как в металле, так и в шлаке, оказывая при этом модифицирующее, микролигирующее и рафинирующее действие [23].

Таблица 1.5
Содержание активных элементов модификатора БСК-2 [23]

<i>Ba</i>	<i>CaO</i>	<i>SrO</i>	<i>MgO</i>	<i>K₂O</i>	<i>Na₂O</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>MnO</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>TiO₂</i>
16,0	21,5	5,5	0,9	3,0	1,5	4,0	0,2	2,9	0,9

Барий не растворим в железе. Стронций малорастворим в железе, а та часть стронция, которая растворяется, оказывает микролигирующее действие. Барий и стронций проявляют модифицирующее воздействие как на ферритную основу, так и на большую группу неметаллических включений, сульфидов и фосфидов.

Модификатор БСК-2 благоприятно воздействует на сульфиды, фосфиды и неметаллические включения, т.е. выполняет роль десульфураторов, дефосфораторов и в некоторой степени раскислителей. Он измельчает их, переводит в глобулярную форму и частично убирает их с границы зерна, переводя их внутрь зерна. На рисунке 1.21 изображено глобуляризованное включение фосфидной эвтектики на границе зерна и в зерне. Влияние БСК-2 на разные марки стали исследовалось и ранее. Исследования проводились на заводах: ИЗТМ (г. Иркутск), ЛВРЗ ОАО «РЖД» (г. Улан-Уде), ЧАЗ (г. Чебоксары). Все эти исследования подтвер-

оказывают положительное влияние БСК-2 на размер зерна, размер, форму и положение НВ [23].



Рисунок 1.21 – Включения фосфидной эвтектики на границе зерна и в зерне [23]

На предприятии ООО «Промтрактор-Промлит» были отработаны несколько схем подачи модификатора БСК-2. Одни схемы были направлены на более сильное рафинирование, в других схемах упор был сделан на модифицирование. После термической обработки на отливках из стали, выплавленной с применением модификатора БСК-2 из расчета 7–8 кг/т жидкой стали по отношению к отливкам из стали, выплавленной без применения БСК-2 заметно повысились показатели ударной вязкости при неизменных прочностных характеристиках. Увеличение показателя KCV при

минус 60 °С в среднем составило 67,2 % (в отдельных случаях – до 130 %, увеличение КСУ при минус 60 °С и при +20 °С в среднем \approx 37,2 % и 34,8 % соответственно. Микроструктура образцов однородная ферито-перлитная, мелкозернистая (8–10 балл). Неметаллические включения глобулярные, мелкие, равномерно распределенные и, как следствие этого – тонкие межзеренные границы.

Применение БСК-2 при выплавке стали 20ГЛ для изготовления ответственных отливок для ОАО «РЖД» рационально для снижения содержания серы, фосфора и неметаллических включений, а также для их измельчения и глобуляризации, для повышения механических и эксплуатационных свойств отливок. При реальных концентрациях серы только ЩЗМ и РЗМ могут образовывать в области жидкого состояния сульфидную фазу, способную к выделению из металла. Применение БСК-2 позволяет удалять от 15 % до 30 % серы в окончательной пробе по отношению к содержанию серы в металле по расплаву. Барий и стронций являются глобуляризаторами сульфидов, фосфидов и неметаллических включений. В свою очередь глобуляризация примесей повышает пластичность и ударную вязкость металла, повышая зернограничное упрочнение. Очищая сталь от вредных примесей, БСК-2 снижает анизотропию механических характеристик стали, а также улучшает литейные свойства стали. Обеспечивая снижение общего количества вредных примесей в жидком металле, БСК-2 способствует улучшению жидкотекучести, условия питания или пропитываемость отливок, обеспечивает высокие технологические и

механические свойства стали. Сочетаясь с доводкой плавок и особенно с их конечным раскислением алюминием, модифицирование в значительной степени определяет характер кристаллизации, степень глобулярности вредных примесей, благоприятную микроструктуру и комплекс других свойств стали.

В России за последние десятилетия произошел прорыв по совершенствованию агрегатов и технологий обработки металлических расплавов посредством их более эффективного модифицирования с достижением значимых результатов в нужном направлении по их десульфурации, дефосфоризации, раскислению и другим процессам с одновременным повышением прочностных и пластических свойств, ударной вязкости металла и других его характеристик, включая глобуляризацию вредных примесей.

Внепечная обработка стали кальцийсодержащими порошковыми проволоками – неотъемлемая часть современной технологии металлургического производства. Однако применение только силикокальция и алюминия не всегда позволяет изменять в нужном направлении морфологию неметаллических включений (НВ) и создавать условия для их удаления из жидкого металла. Результаты опытно-промышленного эксперимента по производству стали с повышенными требованиями к НВ применением с силикокальцием марки СК40 порошковой проволоки, включающей комплексные наполнители, содержащие, кроме кальция, такие щелочноземельные металлы, как барий и стронций, позволили установить, что замена силикокальция на опыт-

ные варианты модификаторов обеспечивает снижение максимального балла загрязненности листового проката, в частности, по хрупким силикатам с 4,0 до 1,5–2,5. Максимальная загрязненность листового проката по недеформирующимся силикатам снизилась с 4,0 баллов по стандартной технологии до 3,0–3,5 баллов при использовании опытных микрокристаллических модификаторов. Результат снижения загрязненности стали НВ за счёт таких модификаторов – улучшение основных эксплуатационных свойств металлопроката. Замена силикокальция на опытные модификаторы привела к улучшению прочностных свойств проката как при статических испытаниях на растяжение, так и при динамических испытаниях на ударный изгиб при пониженных температурах. Отмеченное влияние микрокристаллических модификаторов наблюдалось при всех расходах опытных модификаторов, причём с увеличением расхода модификаторов положительное влияние на механические свойства стали, как правило, усиливалось [24].

Контрольные вопросы

1. Назовите примеси сталей. Какие примеси являются вредными, а какие полезными?
2. Что такое краснеломкость? Как предупредить этот дефект?
3. Как влияет модифицирование на строение и свойства металла?
4. Поясните причину воздействия модифицирования на строение и свойства металла.

5. Чем определяется металлургическое качество стали?
6. Что включает в себя технология модифицирования стали?
7. Назовите цели модифицирования сталей.
8. На решение каких задач направлено модифицирование сталей?
9. Что представляют собой такие неметаллические включения – оксиды, оксисульфиды, нитриды, фосфиды?
10. Что представляют собой такие неметаллические включения – сульфиды, нитриды, фосфиды?
11. Что представляют собой такие неметаллические включения – интерметаллиды, карбиды?
12. В чём проявляется влияние редкоземельных металлов при модифицировании стали?
13. В чём проявляется влияние щелочноземельных металлов при модифицировании стали?
14. Какое влияние оказывают калий и барий при модифицировании стали?
15. Какое влияние оказывают калий и барий при модифицировании стали?
16. Какое влияние оказывают комплексные модификаторы при модифицировании стали?

Часть 2. АГРЕГАТЫ, МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ СТАЛИ МОДИФИКАТОРАМИ

2.1. Наилучшие доступные технологии при производстве стали в конвертерах

Наилучшие доступные технологии при производстве стали в конвертерах, направленные на получение качественных характеристик готовой стали, включают комбинированную продувку расплава кислородом с подачей снизу нейтрального газа (азот, аргон) через донные блоки и внепечную обработку расплава стали (на печи-ковше, вакууматоре). **Внепечная обработка** является в настоящее время – **ключевое звено** современных процессов получения качественной стали посредством повышения степени **рафинирования жидкого металла** [25].

Прорыв по совершенствованию агрегатов и технологий рафинирования жидкого металла обусловлен достижением значимых результатов в процессах его раскисления, дегазации, десульфурации, дефосфоризации и других процессов, а именно – дополнительной обработки в нужном направлении металлических расплавов посредством более эффективного их модифицирования, особенно включая использование микрокристаллических модификаторов на основе РЗМ и ЩЗМ [24]. Модифицирование, в целом, – это процесс направленного изменения структуры жидкого металла или сплава под воздействием малых количеств специально вводимых добавок или физических методов

обработки жидкой стали с целью удаления из расплава металла вредных примесей.

2.1.1. Десульфурация расплава в конвертере

Процесс выплавки стали в конвертере с основной футеровкой из чугуна и добавляемого лома путём продувки расплава кислородом через верхнюю водоохлаждаемую фурму в России принято называть кислородно-конвертерным процессом [26].

Продувка кислородом сверху (рисунок 2.1) оказалась наиболее эффективным способом окисления углерода и вредной примеси – серы. Однако вследствие образования относительно небольшой реакционной зоны и недостаточного перемешивания металла кислородной струёй в металлической ванне образуются застойные зоны, вследствие чего реакции окисления не достигают равновесия.

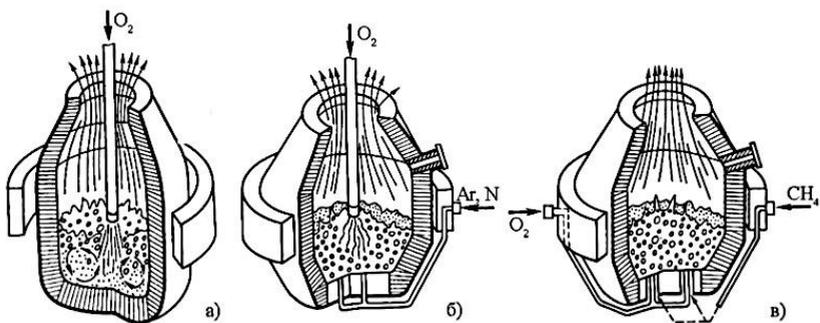


Рисунок 2.1 – Разновидности кислородно-конвертерных процессов производства стали [26]:

а – продувка кислородом сверху; б – комбинированная продувка (кислородом сверху и различными газами и смесями через дно); в – донная комбинированная продувка кислородом O_2 и природным газом CH_4

Продувка сверху может вызвать высокое содержание в стали оксидных неметаллических включений. Для приближения реакций к состоянию равновесия используют комбинированную продувку кислородом сверху и инертным газом снизу (рисунок 2.1, б), а для решения некоторых специальных задач используются варианты донной продувки кислородом в защитной оболочке из различных газов (рисунок 2.1, в).

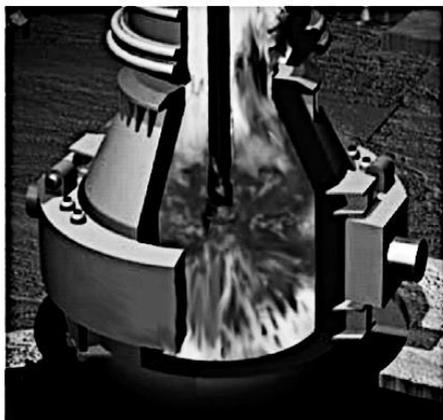
В конце 60-х гг. XX века в ФРГ был разработан кислородно-конвертерный процесс с продувкой кислородом через дно в защитной оболочке из топлива. В качестве топлива используется жидкое (мазут) или газообразное (природный газ) топливо.

За полтора века существования конвертеров и более чем полувековое развитие кислородно-конвертерного процесса разработано и в настоящее время применяется его несколько его разновидностей: наряду с «классическим» процессом используется процесс с донной продувкой азотом, природным газом, инертным газом, а также различными смесями, включая порошок извести (рисунок 2.2), что в определённой мере способствует дополнительной десульфурации металлического расплава, подвергающегося более интенсивному перемешиванию, то есть рафинированию жидкого металла от вредной примеси – серы, что в целом несомненно благотворительнее сказывается на качестве стали, выплавляемой в инновационных разновидностях кислородно-конвертерного процесса.

1. Бессемеровский
1856



2. Томасовский
1879



10. MRP
1983



9. МТВ(МВН)
1981



3. Кислородный
(LD) 1952



4. QBM/Q-BOP
1968



5. AOD
1969



6. Comb-blowing
1977



7. KMS
1978



8. LD-CB
1981



Рисунок 2.2 – Развитие способов продувки металла в конвертере с запатентованными обозначениями международной аббревиатуры технологий продувки и годом их внедрения [26]

2.1.2. Главные особенности выпечной обработки жидкой стали

При производстве стали металл подвергается различным технологическим операциям, в ходе которых имеют место сложные гидро-, газодинамические, физико-химические и теплофизические процессы. Одним из этапов производства стали в металлургическом переделе является выпечная (ковшевая) обработка стали. Под этим названием скрывается совокупность нескольких технологических

операций, совершаемых после выпуска металла из плавильного агрегата в сталеразливочный ковш и перед разливкой стали (в изложницы или на машинах непрерывного литья заготовок) [27].

Сталь необходимого химического состава и определённого качества формируется, по существу, в сталеразливочном ковше, в котором расплав полупродукта подвергается обработке на одном или нескольких специализированных агрегатах. Термодинамические условия проведения технологических операций в специализированных внепечных агрегатах (вакуум, регулируемый состав атмосферы, шлак оптимального состава) и более благоприятные кинетические условия (интенсивное перемешивание, большая поверхность взаимодействия фаз, введение добавок в объём расплава) обеспечивают достижение более существенных результатов, чем при их проведении в плавильных агрегатах. В зависимости от используемых методов и агрегатов внепечная обработка позволяет достичь:

- низкой (менее 0,010–0,005 %) концентрации углерода, которая достигается вакуумированием, продувкой кислородом с аргоном;

- глубокого (до содержания менее 0,003 %) рафинирования от серы, которое обеспечивается путём обработки расплава специально подобранным шлаком, введением в металл десульфураторов;

- раскисления с малым загрязнением металла включениями, что обеспечивается вакуумированием и введением раскислителей, лигатур и модификаторов вглубь расплава;

- удаления водорода (до содержания менее 0,0002 %) путём продувки инертными газами и вакуумирования;
- получения металла с узкими пределами содержания элементов благодаря вакуумированию и введению элементов при низком окислительном потенциале шлака;
- выравнивания и регулирования в узких пределах температуры металла за счёт подогрева расплава в сталеразливочном ковше и усреднения температуры продувкой инертными газами [26].

Постадийное осуществление технологических операций в разнесенных агрегатах позволяет корректировать результаты операций, проводимых на предыдущей стадии, без снижения темпа производства, что значительно повышает точность и стабильность получаемых результатов.

Внепечная обработка в настоящее время является ключевым звеном современных процессов получения качественной стали – повышения степени рафинирования металла.

Наиболее широко внепечная обработка используется при производстве высокопрочных конструкционных марок стали для машиностроения, судостроения, газонефтяного комплекса (особенно для изделий, работающих в условиях низких температур), автомобильной промышленности, электротехники.

Главные цели технологии внепечной обработки жидкой стали:

- перемешивание и усреднение (гомогенизация);

- корректировка и доведение химического состава до заданных значений;
- обеспечение требуемой температуры металла перед началом процесса разлива;
- дегазация (удаление нежелательных газов, таких как водород и азот);
- обеспечение чистоты металла по неметаллическим включениям за счет интенсификации перемешивания.

Технологические операции рафинирующей доводки жидкой стали выполняются в сталеразливочном ковше [26]:

- на установке доводки металла (УДМ) или агрегате доводки стали (АДМ);
- в агрегате «ковш-печь»;
- в вакууматоре (циркуляционного, порционного или объемного рафинирования).

Виды внепечной обработки стали обычно объединяются в следующие группы:

- присадка в ковш различных реагентов (рафинирующих и легирующих);^[17]_{SEP}
- продувка металла инертным газом;^[17]_{SEP}
- вакуумная обработка;
- нагрев и охлаждение металла в ковше.

Выбор вида (способа) внепечной обработки определяется технологической схемой производства стали. Наиболее эффективным способом внепечной обработки стали является комплексная обработка расплава в сталеразливочном ковше на агрегатах «ковш-печь», обеспечивающих

нагрев и перемешивание стали в ковше, ее усреднение и корректировку химического состава.

Использование внепечных методов обработки расплава для повышения качества металла обычной выплавки и увеличения производительности плавильных агрегатов, включая и кислородный конвертер, и высокомоощную дуговую сталеплавильную печь, использующихся в качестве агрегатов для расплавления лома, обезуглероживания и дефосфорации чугуна или иных железосодержащих материалов, позволило освоить производство металла, получение которого традиционными способами было бы невозможно. Примером может служить, в частности, так называемая IF-сталь (сталь со свободными междоузлиями) с ультранизким содержанием примесей внедрения – углерода ($< 0,003 \%$), азота ($< 0,004 \%$) и серы ($< 0,003 \%$). Такая IF-сталь не имеет предела текучести, т.е. способна работать вплоть величины до предела прочности без признаков пластической деформации [26].

2.1.3. Внепечная обработка жидкой стали в сталеразливочном ковше

Применение технологии внепечной обработки жидкой стали в сталеразливочном ковше кроме увеличения производительности дуговых печей и уменьшения угара ферросплавов также положительно сказывается на улучшении качества стали и свойствах металлопродукции (механических свойствах, коррозионной стойкости и др.) за счёт раскисления, легирования, рафинирования и доводки металла до нужной температуры перед разливкой в изложницы или

на установках непрерывной разливки стали (УНРС). Внепечная обработка стали («ковшевая металлургия») стала широко применяться для любых её марок.

Разработаны простые (одним методом) и комбинированные способы внепечной обработки стали одновременно несколькими методами:

- в обычном сталеразливочном ковше (рисунок 2.3, а);
- в сталеразливочном ковше, оборудованном для вдувания газа или газопорошковой струи снизу через смонтированные в днище специальные устройства (рисунок 2.3, б и в);
- в сталеразливочном ковше, оборудованном приспособлением, подающим газ через разливочный канал ковшового затвора (рисунок 2.3, г и д).

Процессы, обеспечивающие интенсивное перемешивание жидкого металла в сталеразливочном ковше за счёт использования энергии сжатого газа, вводимого в расплав различными способами, применяют, в первую очередь, с целью усреднения его температуры и химического состава перед последующей разливкой.

Наибольшее распространение на металлургических предприятиях получили способы перемешивания стали с помощью инъекции газа посредством использования таких продувочных устройств, как погружаемые фурмы (рисунок 2.3, а), пористые пробки (рисунок 2.3, б), устанавливаемые в днище сталеразливочного ковша, и приспособления, подающие газ через разливочный канал ковшового затвора (рисунок 2.3, г и д) [29].

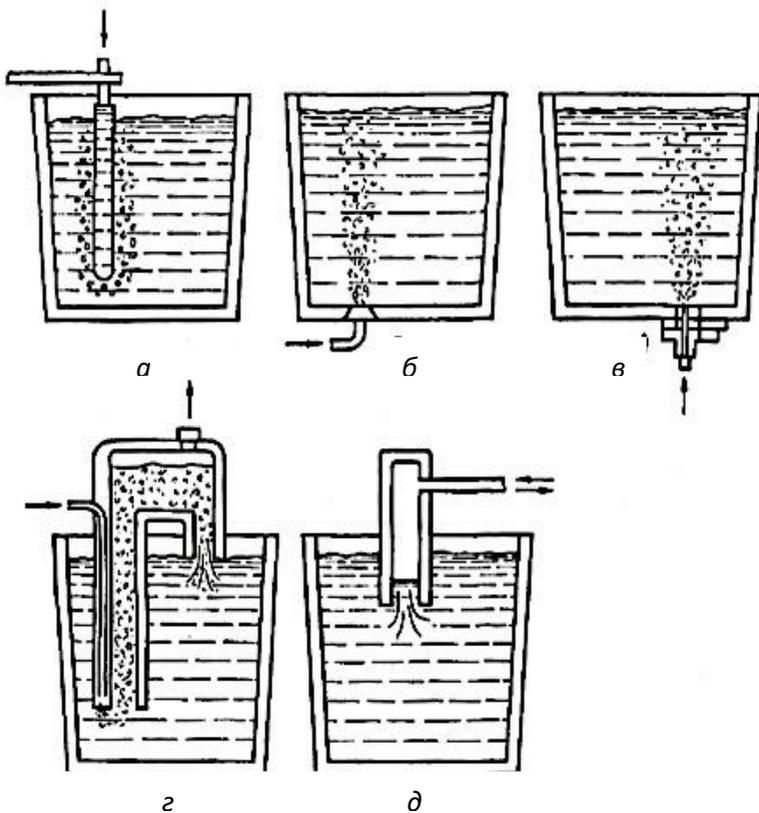


Рисунок 2.3 – Способы перемешивания жидкой стали в сталеразливочном ковше [29]

Газлифтное перемешивание (рисунок 2.3, г) основано на направленной циркуляции металла в специальной футерованной огнеупорным кирпичом камере, снабженной всасывающим и сливным патрубками. При подаче газа во всасывающий патрубок, погруженный в жидкий металл, образуется газожидкостная смесь, кажущаяся плотность которой значительно меньше плотности расплава, в результа-

те чего уровень двухфазной смеси в камере начинает подниматься. В момент достижения смесью уровня сливного отверстия в верхней части камеры, когда газометаллическая смесь начнет сливаться в ковш, происходит направленная циркуляция жидкого металла, способствующая снижению колебаний его химического состава и градиента температуры в объеме перемешиваемой ванны [29].

В отличие от зарубежного аналога разработанный в Донецком научно-техническом университете (ДонНТУ) способ пульсационного перемешивания, принципиальная схема которого показана на рисунке 2.3, д, предусматривает заполнение полости огнеупорной трубы (колонны) расплавом и периодическое его вытеснение вглубь ковша нейтральным газом, подаваемым под избыточным давлением. Эффективность данного метода значительно повышается при обеспечении согласования собственных частот колебания металла в системе колонна-ковш и собственных частот упругих колебаний газометаллического столба [29].

При продувке инертным газом через отверстие внизу сталеразливочного ковша происходит очищение металла от газовых и неметаллических включений, а также перемешивание металла и усреднение его состава. Если необходимо понизить содержание углерода в металле, то к инертному газу добавляют кислород. Продувкой жидкого металла инертным газом регулируют температуру металла [28].

Вышеотмеченные методы перемешивания жидкого металла успешно применяют и в сочетании с другими видами внепечной (ковшевой) обработки, входящими в груп-

пу, объединяющей способы рафинирования стали специально приготовленных шлакообразующих смесей, позволяющих снизить содержание в металле S и O_2 [29].

В отдельную группу входят способы выпечной (ковшевой) обработки стали порошкообразными реагентами, вводимыми в металл с целью его дефосфорации, десульфурации, раскисления и легирования, а также науглероживания. Введение реагентов в металлическую ванну сталеразливочного ковша осуществляют вдуванием струей газоносителя, «выстреливанием» капсул или подачей материала в виде проволоки. Для применения технологии инъекции стали газопорошковыми смесями нужны механизмы, обеспечивающие дозирование, устойчивую транспортировку и ввод порошкообразных реагентов в жидкий металл. Наиболее целесообразно для этих целей использование погружных и донных фурм, посредством трубопроводов связанных с аэрационными питателями (рисунок 2.4, а).

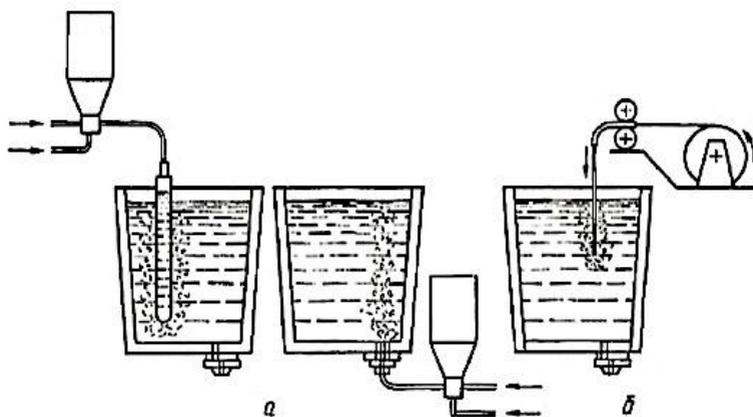


Рисунок 2.4 – Схема ввода порошкообразных реагентов в жидкую сталь при обработке в разливочном ковше [26]

Поскольку многие из порошкообразных материалов взрывоопасны, то при их использовании необходимо применение особых мер предосторожности. По этой причине для подачи в расплав высокоактивных порошков в настоящее время применяют либо специальные пневматические устройства, «выстреливающие» в металл капсулы в виде цилиндров массой до 0,8 кг, изготовленные из соответствующих материалов, либо начинённую ими стальную проволоку. Для ввода проволоки в расплав с расчётной скоростью разработаны трайб-аппараты, снабженные подающими роликами, вращаемыми электромеханическим или пневматическим приводом (рисунок 2.4, б).

Способы модифицирования, микролегирования и инокулирования стали, предполагающие дозированный ввод в неё лигатур или модификаторов во время разливки отдельно объединены в специальную группу. Подачу необходимых компонентов в изложницу осуществляют с помощью стационарных установок, размещенных на разливочной площадке (рисунок 2.5, а), либо с использованием навесных устройств, устанавливаемых на время разливки на корпус ковша, как показано на рисунке 2.5, б. [29].

Наряду с рассмотренными способами воздействия на жидкий металл в сталеразливочном ковше в настоящее время применяют такие дополнительные меры, как отсечка конечного шлака во время выпуска плавки и защита стали от вторичного окисления в процессе разливки.

При наличии в ковше большого количества высокоокисленного шлака резко увеличиваются потери раскислителей и лигатур из-за их угара, но и растёт интенсивность разрушения «шлакового пояса» футеровки ковша. В связи с этим ведётся поиск эффективных решений проблемы отсечки конечного шлака при выпуске стали из плавильных печей и конвертеров. С этой целью предложено использовать специальные конструкции желобов, отводящих шлак в чашу во время схода металла в разливочный ковш, или отсечных элементов поплавоквого типа, вводимых в ванну кислородного конвертера и блокирующих его выпускной канал при подходе к нему слоя шлакового расплава.

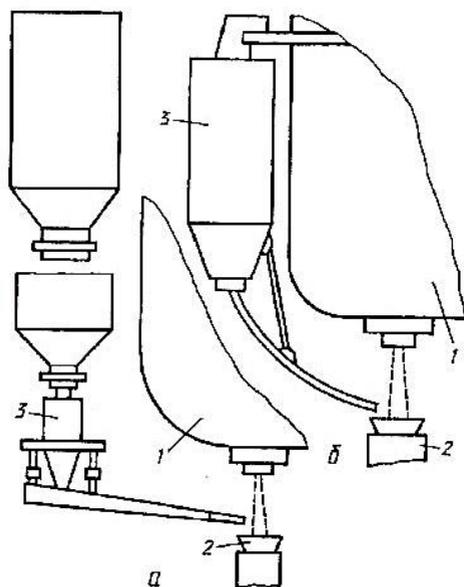


Рисунок 2.5 – Устройства для подачи сыпучих материалов под струю разливаемой в изложницы стали [29]:

1 – ковш; 2 – центровая; 3 – дозатор

Заметное влияние на качественные показатели получаемой металлопродукции оказывают газогидродинамические явления, происходящие во время разливки при взаимодействии истекающей из ковша струи металла с окружающей атмосферой. Для устранения негативного воздействия кислорода воздуха на разливаемый металл применяют различные способы экранирования струи, включающие использование специальных огнеупорных труб или создание кольцевой газовой завесы (рисунок 2.6) [30].

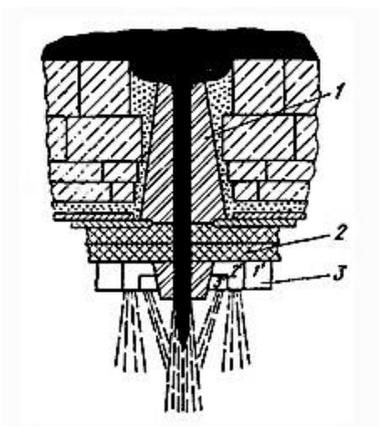


Рисунок 2.6 – Схема действия устройства для защиты струи металла [30]:

1 – стакан; 2 – шибберный затвор; 3 – кольцевой аргонопровод

Устройство состоит из трех камер. Аргон подается в предварительную камеру 1, из нее он поступает в верхнюю и нижние камеры 2 и 3, которые имеют выход на специальные кольцевые щели, расположенные по периметру устройства, шириной 1 мм. Через щели в виде сплошных

завес инертный газ аргон создает защитную атмосферу вокруг струи металла. Одна защитная завеса направлена под углом к струе металла, точка соприкосновения завесы с поверхностью струи находится ниже верхнего торца изложницы или прибыльной надставки. Вторая газовая завеса организована параллельно истекающей струе. Такая защита металла при разливке сверху обеспечивает содержание кислорода в районе струи металла 4,6–9,0 %. Изменением давления аргона, поступающего в предварительную камеру, регулируется устойчивость и протяженность газовых завес. Аргон для защиты металла подается под давлением 49–294 кПа (0,5–3,0 ат). При давлении аргона 98 кПа (1 ат) величина эффективной защиты составляет 900 мм, а при давлении 294 кПа (3 ат) 1500 мм. Крепление устройства осуществляется непосредственно на стакан шибберного затвора. Стойкость устройства – до 50–100 плавов.

Положительные качества устройств для защиты струи металла от нежелательных последствий при разливке в различном конструктивном исполнении достаточно подробно приведены в обзоре по защите металла от вторичного окисления [31].

Для интенсификации рафинирования металла от серы, фосфора и кислорода применяют перемешивание металла с жидким синтетическим шлаком, который наводится при использовании твердых шлаковых смесей. Для снижения содержания серы в металле и его раскисления используют известково-глиноземистый шлак, для дефосфорации – известково-железистый. Рафинирование проводят путем

смешивания нагретого до 1600 °С синтетического шлака со струей металла, сливаемого из печи в сталеразливочный ковш. Рафинирование металла синтетическим шлаком можно совмещать с одновременной продувкой инертным газом или вакуумированием [28].

2.1.4. Рафинирующая внепечная обработка жидкой стали вакуумом

Способы рафинирующей дегазации стали, предназначенные для снижения содержания газов в жидком металле, постоянно совершенствуются и развиваются. В настоящее время получили распространение следующие способы вакуумирования (рисунок 2.7) [28]:

- ковшового;
- порционного;
- циркуляционного;
- и струйного.

При ковшовом рафинировании (рисунок 2.7, а) разливочный ковш с жидкой сталью устанавливается в вакуумную камеру, в которой создается разрежение, способствующее удалению газов из расплава. Для интенсификации процесса дегазации во время вакуумирования металл продувают аргоном через пористую пробку, установленную в днище ковша.

Процесс порционного вакуумирования осуществляют в разливочном ковше с использованием вакуумной камеры, в которую через погружной патрубок засасывается порция металла, после чего камера периодически поднимается с таким расчетом, чтобы нижний конец патрубка оставался

ниже уровня стали, как это показано на рисунке 2.7, б. Затем металл сливается в ковш, а в камеру засасывается очередная порция жидкой стали, подвергаемая обработке.

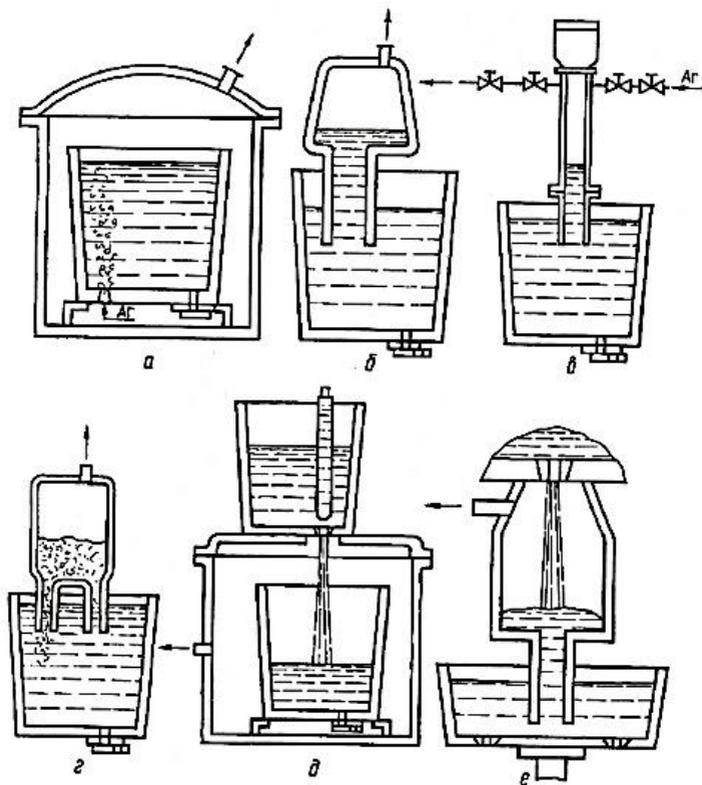


Рисунок 2.7 – Схемы основных способов вакуумирования стали [28]:

a – ковшового; *б* – порционного; *в* – пульсационного; *г* – циркуляционного; *д* – струйного; *е* – непрерывного при разливке стали на УНРС

К одной из разновидностей порционного вакуумирования может быть отнесен разработанный в Японии метод пульсационного перемешивания, схематично представлен-

ный на рисунке 2.7, в. Осуществляется поочередное включение и отключение подачи аргона в полость погружаемой в жидкую сталь огнеупорной трубы и вакуумного насоса, обеспечивающего откачку из нее газа с интенсивностью примерно $10 \text{ м}^3/\text{мин}$. При этом жидкий металл в полости трубы, а следовательно, и в сталеразливочном ковше начинает интенсивно пульсировать, в результате чего повышается степень его рафинирования [50].

Для реализации процесса циркуляционного вакуумирования камеру снабжают двумя погружаемыми патрубками. По одному из них в момент создания разрежения в камеру подается аргон, поэтому плотность металла, находящегося в данном патрубке, снижается, что способствует подъему стали в полость трубы, где происходит ее дегазация. Затем по сливному патрубку обработанная сталь возвращается в разливочный ковш, вследствие чего возбуждается циркуляция стали (рисунок 2.7, з).

Струйное вакуумирование осуществляется в процессе перелива или разливки металла. При этом обработке вакуумом подвергается струя стали, переливаемой из сталеразливочного ковша в промежуточный ковш или из сталеразливочного ковша в изложницу. При этом в обоих случаях металлоприемник располагается в вакуумной камере (рисунок 2.7, д).

Известно промышленное опробование метода непрерывного вакуумирования при разливке стали на установках непрерывной разливки стали (УНРС). Вакуумную дегазацию струи стали осуществляют в проточной камере, ко-

торую размещают между сталеразливочным и промежуточным ковшами (рисунок 2.7, е). Этот метод позволяет одновременно осуществлять дегазацию и защиту стали от вторичного окисления, что следует отнести к его достоинствам.

2.1.5. Внепечная обработка жидкой стали в агрегатах «ковш-печь»

Обработка стали в агрегатах «ковш-печь», в отличие от плавки в конвертере или современной дуговой сталеплавильной печи, процесс восстановительный. Одним из главных требований его проведения является наличие слабо восстановительной или нейтральной атмосферы в ковше. Это дает возможность наведения восстановительного шлака, обеспечивающего низкий угар раскислителей и легирующих материалов, а также глубокую десульфурацию металла в условиях интенсификации процесса продувкой аргоном [26].

Кроме простых (одним методом) способов внепечной обработки стали в обычном сталеразливочном ковше и в сталеразливочном ковше, оборудованном для вдувания газа или газопорошковой струи снизу через смонтированные в днище устройства, разработаны комбинированные способы [28]: в установке «ковш-печь» с крышкой (сводом), через которую опущены электроды, нагревающие металл в процессе его обработки (при этом установка оборудована системой подачи ферросплавов из бункеров или микродобавок порошковой проволокой); в агрегате типа конвертера с продувкой металла кислородом, аргоном (агрегат аргоно-

кислородного рафинирования); в агрегате типа конвертера, снабженном оборудованием для вакуумирования; в вакууматорах различного типа.

Многофункциональный агрегат «ковш-печь» позволяет вести нагрев металла тремя вводимыми электродами (рисунок 2.8), дозировать кусковые ферросплавы, флюсы или различные добавки (углерод, раскислители, модификаторы), в т.ч. с применением порошковой проволоки.

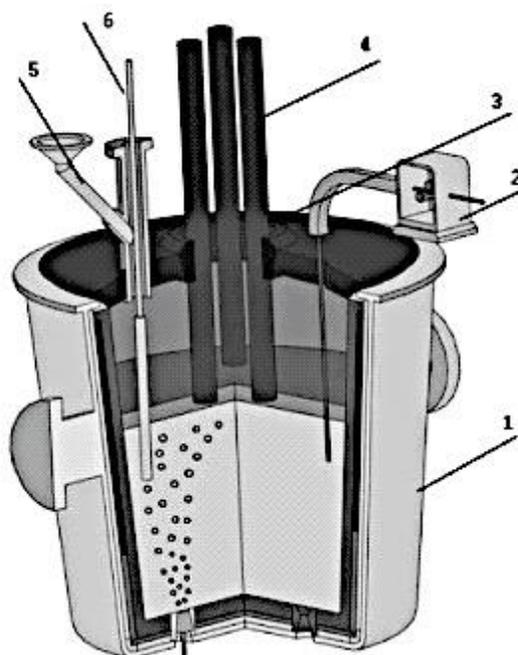


Рисунок 2.8 – Общая схема установки «ковш-печь» [32]:
1 – сталеразливочный ковш; 2 – трайб-аппарат; 3 – свод агрегата «ковш-печь»; 4 – графитированные электроды; 5 – воронка подачи сыпучих материалов; 6 – аварийная фурма

В течение последних двух десятилетий агрегаты «ковш-печь» непрерывно совершенствовались как в технологическом, так и в конструкционном плане. Это позволило достичь весьма высоких показателей, как в части качества стали, так и в части энерго- и ресурсосбережения. Так, средний расход электродов в процессе обработки на установке «ковш-печь» составляет ≈ 10 г/кВт·час, а затраты электрической энергии – 0,3–0,6 кВт·час/т град. Более того, на практике убедительно доказана высокая конкурентоспособность агрегатов «ковш-печь» практически для всего диапазона вместимости сталеразливочных ковшей: от 12–15 т до 350–360 т. При этом в нормальном технологическом режиме обеспечивается нагрев обрабатываемой стали в ковше со скоростью 4–5 °С в минуту. Современный агрегат – имеет вполне устоявшуюся технологическую архитектуру и конструкцию основных функциональных элементов, в состав которых входят [33]:

- система для нагрева металла электрическими дугами;
- система подачи ферросплавов и материалов для рафинирования стали в ковше;
- средства для перемешивания металла инертным газом;
- устройство для подачи порошковой проволоки;
- крышка, устанавливаемая на ковш перед обработкой;
- и т.п.

Для ускорения физико-химических процессов, происходящих в ходе внепечной обработки, на практике наиболее широко используется продувка жидкой ванны ар-

гоном. Практика последних десятилетий показывает, что вопрос рационального перемешивания металла в ковше при продувке аргоном является особенно актуальным при работе установок «ковш-печь». Это объясняется тем фактом, что в ковшах, применяемых на установках «ковш-печь», предусматривается, как правило, один-два (иногда три) продувочных узла, расположение которых регламентируется определенными технологическими соображениями. Последние два десятилетия практически обязательным функциональным элементом агрегатов «ковш-печь» стала операция ввода в расплав порошковой проволоки в стальной оболочке с помощью специальных трайб-аппаратов. Этот приём обеспечивает точное введение в расплав требуемых элементов [33].

Агрегат «ковш-печь» может использоваться в сочетании с обработкой металла на иных агрегатах внепечной обработки [34].

2.1.6. Основные способы вакуумирования жидкой стали

В настоящее время в промышленно развитых странах успешно работают сотни установок внепечного вакуумирования различной конструкции, схемы наиболее распространенных из которых приведены на рисунке 2.9 [35].

На пропускании через соединенную с вакуумным насосом герметичную камеру струи металла при выпуске его из сталеплавильного агрегата, переливе из ковша в ковш, в изложницу или в промежуточную емкость УНРС (ри-

сунк 2.10 базирується способ струйного вакуумирования жидкой стали [36].

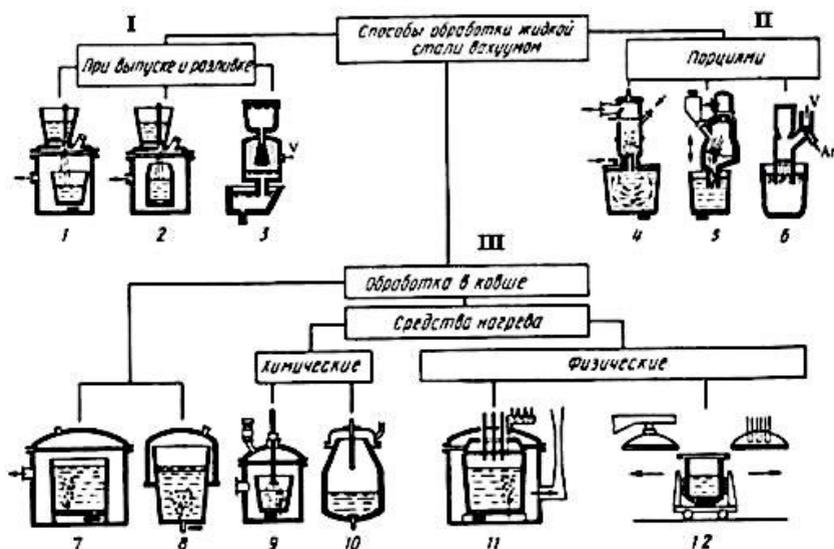


Рисунок 2.9 – Способы вакуумирования стали [35]:

I – вакуумирование в струе: 1 – при переливе из ковша в ковш; 2 – при разливке в изложницу; 3 – поточное вакуумирование; II – вакуумирование в вакуум-камере: 4 – циркуляционное вакуумирование; 5 – порционное вакуумирование; 6 – поточное вакуумирование; III – вакуумирование металла в ковше: 7, 8 – вакуум-кислородное рафинирование; 9, 10 – вакуум-кислородное рафинирование; 11, 12 – комбинированные с дуговым нагревом и вакуумированием

Струйное вакуумирование

В вакуумной камере, которая накрывается крышкой с отверстием, перекрываемым алюминиевой пластиной, перед началом обработки жидкой стали способом струйного вакуумирования создается разрежение. При открывании стопора или шиберного затвора сталеразливочного ковша

струя вытекающей стали прожигает алюминиевую пластину и, попадая в разреженное пространство вакуумной камеры, разделяется на капли различной величины.

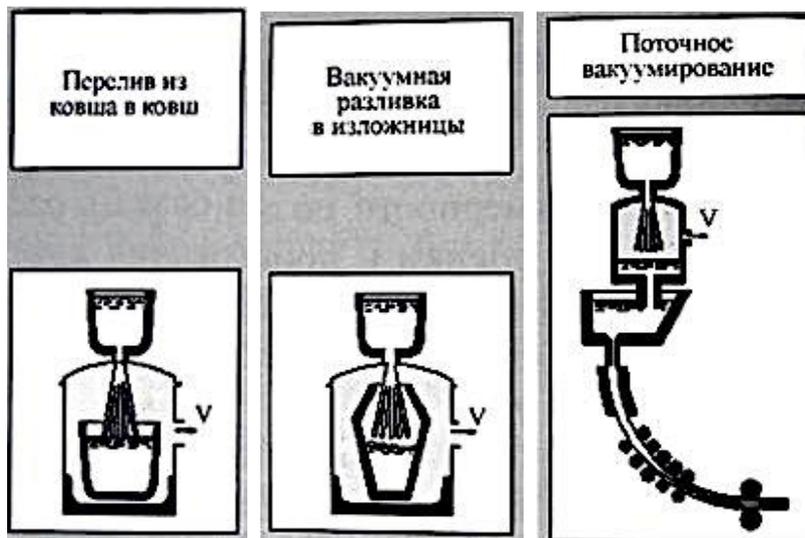


Рисунок 2.10 – Способы струйного вакуумирования стали [36]

При переливе спокойной стали угол раскрытия струи составляет $20\text{--}40^\circ$, а для нераскисленной – до 140° . Развитая поверхность раздела металла и разреженного в вакуумной камере пространства обеспечивает благоприятные условия для раскисления стали, удаления водорода и азота. Дальнейшая дополнительная дегазация происходит с поверхности металла, заполняющего приемную емкость ковша, изложницы или УНРС. Во время перелива металла могут быть введены раскислители, а при переливе в ковш, кроме того, может быть использована продувка ванны аргоном через донную пробку. При всех вариантах вакуумной обра-

ботки струи в результате увеличенного теплового излучения расширенной струи, большого периода нахождения поверхности металла без шлака и значительной продолжительности процесса происходят существенные тепловые потери, особенно при переливе из ковша в ковш, причем в некоторых случаях требуется перегрев металла в печи до 150 °С. Ковш, используемый для заполнения металлом в процессе обработки, устанавливается в вакуум-камере, которая накрывается крышкой, или ковш непосредственно накрывается крышкой с помощью вакуум-плотного фланцевого соединения. В первом случае обеспечивается возможность заполнения вакуумированным металлом, как ковша, так и изложницы, упрощается обслуживание и исключается необходимость в защите кромки ковша от брызг и пыли. Достоинства второго варианта заключаются в уменьшении откачиваемого объема, габаритов и металлоемкости вакууматора, возможности смены разливаемых ковшей без нарушения вакуума над поверхностью расплава в изложнице, недостатки – в необходимости иметь в цехе, по крайней мере, два типа ковша с разными посадочными поверхностями, существенно усложняющими их подготовку и эксплуатацию. Кроме того, в этом случае затрудняется размещение на крышке шлюзового устройства для ввода раскислителей. Внутренние поверхности крышки и вакуум-камеры футеруются, для предотвращения образования настывлей на огнеупорной кладке ковша или стенках изложницы вследствие разбрызгивания струи в крышке вакуум-камеры устанавливаются огнеупорную направляющую трубу. В крышках

размещаются смотровые окна, шлюзовые устройства для ввода кусковых материалов и клапаны для заполнения камеры инертным газом после вакуумирования. Все варианты струйного вакуумирования обеспечивают максимальную степень дегазации в связи с развитой поверхностью капель металла и эффективную защиту его от повторного окисления. Однако в связи с ограниченными технологическими возможностями их применение целесообразно в сочетании с другими, более универсальными методами выпечной обработки, а также при отливке крупных слитков из высококачественной стали.

Разновидностью струйного вакуумирования является поточное, которое представляет собой вакуумную дегазацию струи металла, заливаемого в промежуточную емкость УНРС. В основу этой технологии положены теоретические разработки проф. Г.А. Соколова. С учетом опыта эксплуатации подобного агрегата на НЛМК был разработан агрегат поточного вакуумирования нового поколения, предназначенный для оснащения вертикально-криволинейной УНРС с радиусом кривизны 6 м для отливки слябов прямоугольного сечения 160x1000–160x1600 мм. В разработке принимали участие ПО «Южуралмаш», комбинат «Запорожсталь», ЦНИИчермет, ВНИИметмаш [35]. В существующих цехах с ограниченной высотой может быть применен другой вариант конструкции поточного вакууматора, обеспечивающий непрерывное вакуумирование серии плавок. Устройство содержит вакуум-камеру с крышкой и вакуум-проводом, сталеразливочный ковш с затвором и юбкой, герметично

состыкованной с вакуум-камерой, шлюзовую камеру с вакуумным затвором и механизмами вертикального и горизонтального перемещения, промежуточный ковш [37].

Вакуумирование стали в вакуум-камере

Порционные и циркуляционные вакууматоры характеризуются обработкой относительно небольшой части металла, циркулирующего через вакуумную камеру. Это позволяет существенно повысить интенсивность вакуумирования без ограничений массы обрабатываемой плавки. Известны следующие виды вакуумирования [38]:

- пульсационное – интенсивное перемешивание путем периодического всасывания порции металла в вакуум-камеру и слива в ковш за счет периодического изменения давления (используется редко);

- порционное – порции металла поступают в вакуум-камеру и сливаются обратно за счет возвратно-поступательных вертикальных перемещений вакуум-камеры;

- циркуляционное – металл непрерывно циркулирует через вакуум-камеру за счет подачи инертного газа во всасывающий патрубок (рисунок 2.11).

В настоящее время широкое распространение получили порционный и циркуляционный вакууматоры. По технической сущности и достигаемым результатам они длительное время конкурировали между собой, однако по мере улучшения качества огнеупоров и повышения стойкости футеровки предпочтение все чаще отдается циркуляционному вакуумированию.



Рисунок 2.11 – Способы вакуумирования стали в вакуум-камере [35]

Во многих случаях с учетом технологического и конструктивного подобию порционные вакууматоры за рубежом были переоборудованы в циркуляционные.

Порционное вакуумирование

Порционный способ внепечного вакуумирования, именуемый как *DH*-способ, разработан фирмой «*Dortmund-Hörder Hüttenunion*» (ФРГ). Первая промышленная установка этого типа введена на заводе этой фирмы в г. Дортмунде в 1956 г. Вакуумированию подвергали сталь, выплавленную в мартеновских печах. Емкость ковша составляла 40–110 т. Метод порционного вакуумирования жидкой стали заключается в вакуумной обработке расплавленного металла путем многократного его всасывания из сталеразливочного ковша порциями в вакуумную камеру. При порционном вакуумировании в ковш с металлом опускается патрубок вакуум камеры (рисунок 2.12) и отбирает определенный объем жидкой стали для обработки.

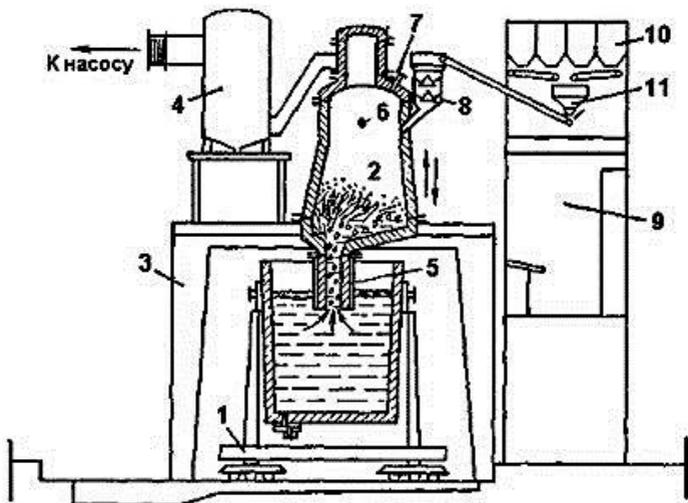


Рисунок 2.12 – Схема порционного вакуумирования стали [35]:

1 – тележка со сталеразливочным ковшом; 2 – вакуумная камера; 3 – стенд гидравлического подъема и опускания вакуум-камеры; 4 – охладитель газа; 5 – всасывающий патрубок; 6 – графитовый нагреватель; 8 – бункер для подачи ферросплавов; 10 – бункера для ферросплавов; 11 – дозирующие весы

Конец всасывающего патрубка 5 всё время оставался опущенным в сталеразливочный ковш и металл из вакуум-камеры после обработки сливается обратно. Затем вакуум-камера опускается и в неё под действием вакуума засасывается очередная порция металла (отсюда название «порционное вакуумирование»). В установках порционного вакуумирования стали рассматриваемого типа порция металла поступает через огнеупорный патрубок из сталеразливочного ковша в вакуум-камеру за счёт создания в ней значительного разряжения на высоту, примерно 1,4 м. При опускании вакуумной камеры в неё натекает из сталеразли-

вочного ковша порция металла (15–18 т), которую, собственно, и подвергают вакуумной обработке. При последующем подъёме вакуумной камеры в пределах рабочего хода происходит соответственно слив обратно в сталеразливочный ковш дегазированного металла. Вследствие последующего вертикального возвратно-поступательного движения вакуумной камеры в пределах рабочего хода через нее проходят новые порции металла. Сливающиеся порции металла из вакуумной камеры опускаются на дно сталеразливочного ковша. В некоторых случаях поднимается и опускается не вакуумная камера, а ковш с металлом, а камера остается неподвижной. Масса одновременно поступающего в вакуумную камеру металла должна составлять не менее 10–12 % от общей массы жидкого металла в талеразливочном ковше. Амплитуда этих перемешиваний может превышать 2 м. Скорость подъема и опускания 6–7 м/мин (3–4 качка в минуту по общепринятой практике). Длительность одного цикла, включающего наполнение и опорожнение вакуум-камеры, составляет 15–30 секунд. Число необходимых циклов оценивают коэффициентом рециркуляции, устанавливаемым эмпирически, в зависимости от массы засасываемого за один цикл металла, состава стали, полноты её раскисления и конкретной задачей вакуумирования. Коэффициент рециркуляции выражают отношением суммарной массы стали, прошедшей через вакуум-камеру за время дегазации к массе стали в ковше. Количество циклов вакуумирования при обработке металла с целью удаления из него водорода и сокращения продолжительности проти-

вофлокенной обработки проката должна составлять не менее:

- при обработке раскисленного металла – 70 циклов;
- при обработке нераскисленного металла – 50 циклов.

Считают, что массу жидкой стали 100 т, необходимо пропустить через установку 3,5 раза. Для этого делают 45–50 качков. Время обработки составляет примерно 15 минут. После ввода раскислителей и легирующих, не нарушая вакуума, дополнительно осуществляют определенное число циклов (4–6), для выравнивания состава и температуры жидкого металла в объеме ковша. Остаточное давление в вакуум-камере, создаваемое многоступенчатым парожетторным насосом к концу дегазации чаще всего составляет 0,5 мм рт. ст. Футеровка вакуумной камеры перед вакуумированием нагревается системой электроподогрева или газокислородными горелками до 1500–1550 °С, что сокращает потерю тепла металлом. За время вакуумирования его температура снижается на 10–25 °С [39].

Порционное вакуумирование является наиболее эффективным средством удаления водорода (по некоторым оценкам, эффективность удаления водорода вдвое, а азота на 60 %, превышают соответствующие показатели циркуляционных вакууматоров). Существует большое количество действующих агрегатов порционного типа, сохраняется потребность в стали с особо низким содержанием водорода, поэтому остается актуальной задача оптимизации параметров технологического процесса порционного вакуумирования, конструкции и размеров вакуум-камеры.

Циркуляционное вакуумирование

О циркуляционном принципе вакуумной обработки металла, реализованном в промышленности фирмой «Тиссен», впервые сообщили в 1959 году. Название этот принцип получил как процесс *RH* (от названия фирм *Ruhrstahl-Heraeus* (ФРГ)). Процесс *RH* осуществляют в камере с огнеупорной футеровкой, оснащенной двумя патрубками, которые погружают в жидкий металл. Схема процесса циркуляционного вакуумирования предствален на на рисунке 2.13.

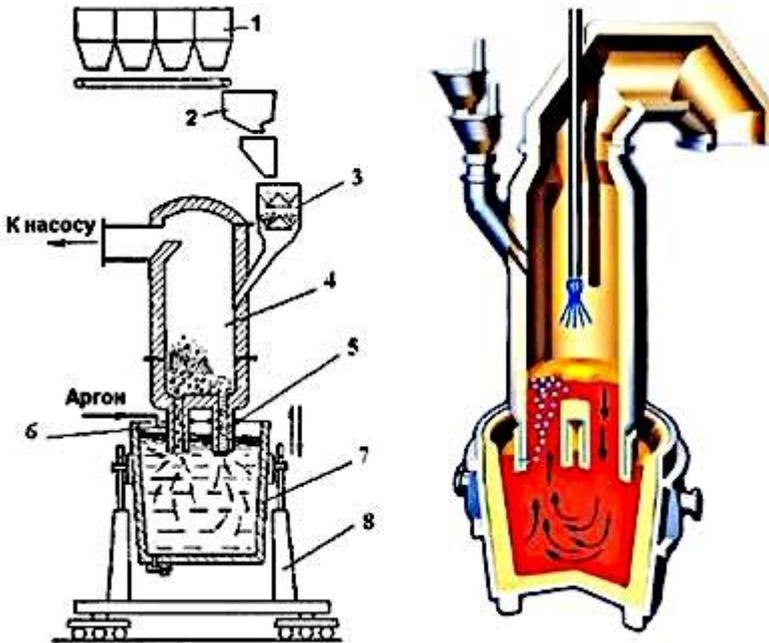


Рисунок 2.13 – Схема циркуляционного вакууматора [35]:

1 – бункера для ферросплавов; 2 – лотковый дозатор; 3 – бункер для подачи ферросплавов; 4 – вакуумная камера; 5 – погружной патрубков; 6 – сопла для подачи аргона; 7 – сталеразливочный ковш; 8 – тележка со сталеразливочным ковшом

Патрубки 5 погружены в расплавленный металл в сталеразливочном ковше. Погружение патрубков 5 осуществляют путем опускания самой вакуум-камеры 4 или при подъёме сталеразливочного ковша 7. Когда из вакуум-камеры 4 начинают откачивать воздух, под действием атмосферного давления расплавленный металл поднимается в вакуумную камеру на барометрическую высоту, равную примерно 1,4 м, и покрывает подину камеры. Одновременно в нижнюю часть всасывающего патрубка 5 подводится транспортирующий газ (аргон), который, увеличиваясь в объеме, поднимается по патрубку, приводит в движение металл и приподнимает уровень зеркала металла в вакуум-камере. При этом из всасывающего патрубка 5 в вакуумную камеру поступает смесь примерно из одной части металла и 10 частей газа со скоростью более 5 м/с. Над всасывающим патрубком 5 расплав стали выпучивается, и из него выбрасываются её брызги, причем для нераскисленной стали высота подъема брызг может достигать 10 м. Дегазированный металл под действием ферростатического напора, создаваемого разностью уровней 50–100 мм, со скоростью 1–2 м/с стекает по сливному патрубку в ковш, где перемешивается и вновь поступает на циркуляцию. Благодаря динамическому напору струя стали, попадая в ковш, достигает его дна, создавая эффективное перемешивание и усреднение состава и температуры стали. Содержание растворенного кислорода в стали с начальной концентрации $[O_2] = 0,006 \%$, при давлении 6,5–0,65 кПа, в течение 10 мин обработки понижается до 0,002 %. Одновременно снижается суммарная

концентрация кислорода за счет удаления оксидных включений под влиянием турбулентных потоков металла. Продолжительность вакуумной обработки определяют в зависимости от массы металла в сталеразливочном ковше и скорости циркуляции. Коэффициент циркуляции должен быть в пределах от 3 до 4. Количество расплава, поступающего в камеру за 1 мин, достигает 30 % от массы стали в ковше, поэтому общая продолжительность обработки составляет 10–15 мин. В результате этого содержание водорода в стали снижается до $(0,9–1,3) \cdot 10^{-4}$ %. Снижение температуры металла в процессе обработки при нагреве футеровки вакуумной камеры до 1450–1550 °С составляет 1,0–1,5 °С/мин. В случае более низкой температуры подогрева камеры скорость охлаждения металла может достигать от 3 до 5 °С/мин и более. Это должно учитываться при определении температуры металла перед выпуском из сталеплавильного агрегата [16].

Ковшовые вакууматоры

Ковшовые вакууматоры основаны на одновременной обработке в вакууме всей массы металла, находящегося в сталеразливочном ковше. При этом для эффективной вакуумной дегазации необходимо интенсивное перемешивание металла, осуществляемое, как правило, вдуванием инертного газа через донные или боковые фурмы. Вакуумная дегазация в ковше (процесс *VD*) может сочетаться с электродуговым нагревом (*VAD* – вакуумно-дуговая дегазация) или с продувкой металла кислородом (*VOD* – вакуум-

кислородная дегазация, или окислительное вакуумирование) (рисунок 2.14).

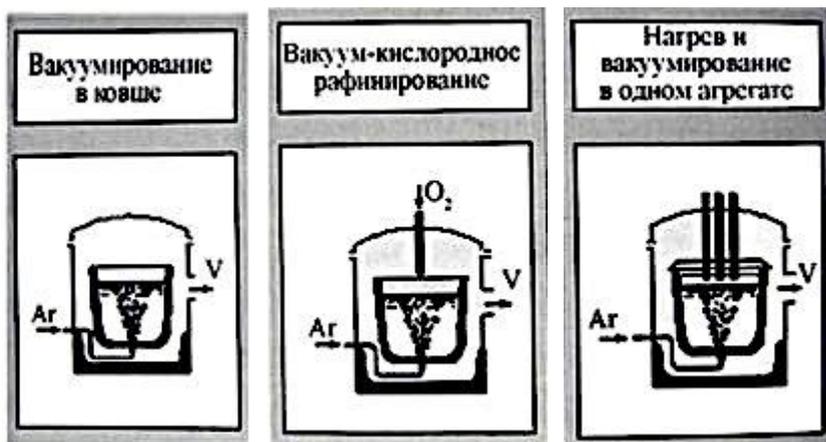


Рисунок 2.14 – Способы ковшевого вакуумирования стали [35]

В целом, обработка *VD/VOD* (рисунок 2.15) обеспечивает следующие преимущества:

- повышение производительности конвертера, электродуговой сталеплавильной печи;
- использование более дешёвых материалов с высоким содержанием углерода (завалка хрома);
- снижение производственных затрат;
- повышение качества стали;
- возможность производства сверхнизкоуглеродистых марок (ELC) с минимальной потерей хрома;
- достижение более жестких допусков по химическому составу;
- более высокий выход хрома.



Рисунок 2.15 – Вакууматор *VD-VOD* [41]

Если вакуумно-дуговая дегазация в новейших агрегатах, внедряемых на металлургических заводах, не применяется из-за сложной конструкции и низкой производительности оборудования, то комбинированные агрегаты *VD/VOD* в последние годы все чаще находят применение при обработке особо низкоуглеродистых сталей [35]. В случае непосредственно накрывания ковша вакуум-плотной крышкой фланец вакуумного ковша и вакуумное уплотнение из-за близкого размещения к расплаву должны быть защищены от брызг, пыли, теплового излучения различными методами, среди которых увеличение свободного борта, применение теплового экрана, контролируемое снижение давления, применение ручных операций и другие.

Так как при ковшовом вакуумировании обработке подвергается вся плавка, необходимо интенсивное перемешивание металла аргоном, который подводится через

огнеупорные пробки, расположенные в нижней части ковша. В целях повышения производительности возможна разработка двухкамерной системы *VD* (*Vacuum Degassing* – Вакуумная дегазация) или же расширение существующей системы. Одной из перспективных установок ковшевого вакуумирования является двухпозиционный камерный вакууматор фирмы *SIEMENS-VAI* (рисунок 2.16).



Рисунок 2.16 – Двухпозиционный камерный вакууматор фирмы *SIEMENS-VAI* [35]:

- 1 – вакуумная камера; 2 – крышка вакуумной камеры;
- 3 – тележка для откатки крышки вакуум-камеры; 4 – вакуумная система; 5 – система подачи легирующих материалов

Целесообразность использования двухпозиционной системы вакуумирования определяется возможностями

плавильного, внепечного и транспортного оборудования цеха, также наличием соответствующих площадей для размещения основного и вспомогательного оборудования. В состав установки вакуумирования стали входит в следующее основное оборудование: вакуумные камеры; крышки вакуумных камер; тележки для откатки крышек; вакуумная система; система подачи легирующих материалов. Установка камерного вакуумирования фирмы *SIEMENS-VAI* имеет ряд преимуществ перед другими типами вакууматоров (порционным и циркуляционным). Основная из них – это возможность обработки всего объема металла и улучшения условий удаления газов и неметаллических включений за счет донной продувки аргоном под вакуумом. На вакууматоре имеется возможность обработки металла порошковой проволокой с помощью трайбаппарата (силикокальций, алюминий и др.) и ввода ферросплавов и легирующих добавок через специальные вакуумные бункера.

Установка ковшевого вакуумирования обеспечивает:

- снижение содержания водорода в стали до $\leq 0,0015$;
- снижение содержания азота в стали до $\leq 0,04$;
- снижение содержания кислорода в стали до $\leq 0,015$;
- снижение содержания оксидных неметаллических включений;
- корректировку состава стали, благодаря подаче ферросплавов и флюсов;
- усреднение химического состава и выравнивание температуры по всему объему ковша, благодаря донной продувке аргоном;

– повышение качества и механических свойств обрабатываемых марок сталей.

Вышеперечисленные преимущества делают необходимым размещение данной установки вакуумирования в составе сталеплавильного производства. Для повышения технико-экономических параметров и характеристик, планируется оснастить двухпозиционный камерный вакууматор фирмы *SIEMENS-VAI* специальной надставкой, разработанной специалистами ОАО «Северсталь», ЗАО «Прочность».

Инновационная разработка двухкамерной системы *VD (Vacuum Degassing* – вакуумная дегазация) или же расширение существующей её системы – система *VOD (Vacuum Oxygen Decarburization* – вакуум-кислородное рафинирование) представляет собой камеру дегазации, дополнительно оборудованную фурмой для кислородной продувки. Такая продувка может понадобиться при производстве нержавеющей стали с крайне низким содержанием углерода (принудительное обезуглероживание) или для химического нагрева расплава в сочетании с введением добавок алюминия или кремния (процесс *VD-OB – Vacuum Degasser with Oxygen Blowing* – вакуумная дегазация с кислородной продувкой). Вакуумный насос соответствующей конструкции и повышенной мощности позволяет справляться с увеличивающимися объемами отходящих газов [42].

Трансформация процесса ковшевого вакуумирования

К общим недостаткам ковшовых вакууматоров относятся опасность перелива металла и шлака через борт ковша, а также связанные с этим необходимость иметь значи-

тельный запас свободного борта ковша и вынужденное ограничение скорости набора вакуума. Высота борта ковша зависит от интенсивности подачи газов, перемешивания и нагрева, степени окисленности металла и разрежения, она должна находиться в пределах 800–1500 мм. В результате увеличения высоты борта масса и стоимость вакуумного ковша по сравнению с обычным больше примерно на 20 %. При невозможности изменить его габариты необходимо уменьшать массу плавки с соответствующей потерей производительности. Специалистами ЗАО «Прочность» и ОАО «Северсталь» разработан принципиально новый процесс вакуумного рафинирования стали *VODF (Vacuum Oxygen Decarburization Full)*, сочетающий преимущества циркуляционного и камерного вакуумирования. Для решения проблемы уменьшения величины свободного борта ковша применен принципиально новый подход, в котором используется разделение пространства вакуум-камеры на две зоны с разным разрежением (рисунок 2.17).

Конструкция надставки 2 позволяет автоматизировать процесс её установки на вакуум-камеру 6 одновременно со штатной теплозащитной крышкой 1, использовать её в качестве защитного экрана от вертикальных брызг металла и шлака, которые образуются в результате продувки жидкой стали аргоном при обезуглероживании. Это предохраняет теплозащитную крышку 1 (рисунок 2.18) и сталеразливочный ковш, а также повышает безопасность всего процесса вакуумирования в случае возникновения аварийных ситуаций.

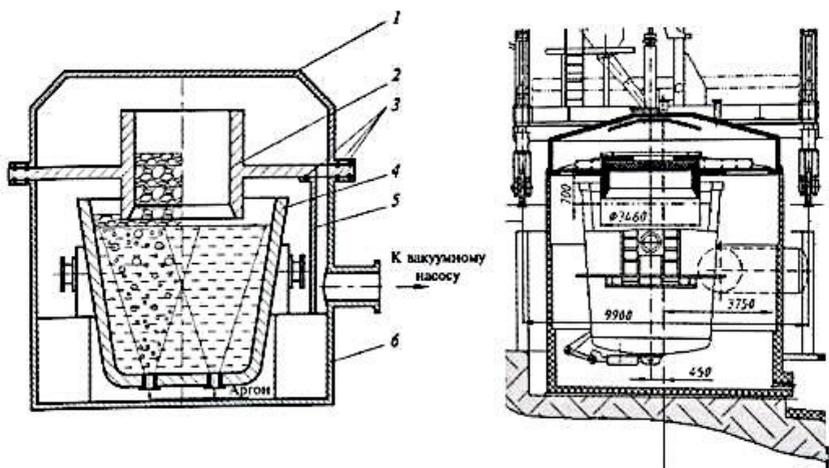


Рисунок 2.16 – Принципиальная схема процесса VODF [35]:

1 – теплозащитная крышка; 2 – надставка; 3 – уплотнение; 4 – сталеразливочный ковш; 5 – вставка; 6 – вакуум-камера

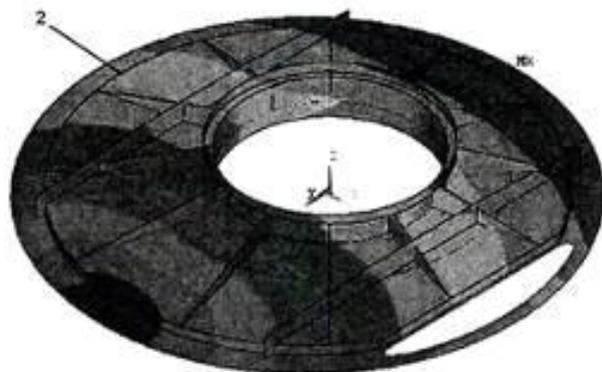


Рисунок 2.18 – Теплозащитная крышка [35]

Разделение зоны дегазации вакуумной камеры на две части гидравлическим затвором позволяет сократить длительность набора вакуума. Циркуляция металла в зоне

между внутренним бортом ковша и наружной поверхностью патрубка надставки способствует дополнительному перемешиванию металла и увеличивает площадь контакта жидкого металла с зоной разрежения, что уменьшает длительность дегазации и приближает технологическую эффективность процесса *VODF* к эффективности процесса *RH* (см. рисунок 2.13) при существенном снижении производственных расходов. Надставку можно применять на всех установках ковшового вакуумирования стали, при этом увеличение производительности модернизированной установки может достигать 15 % при снижении себестоимости на 1–2 %. Внедрение способа на действующих производствах не требует больших капитальных затрат и длительных остановок работающих агрегатов *VD* и *VOD*. Внедрение способа и устройства позволяет использовать имеющееся оборудование (сталеплавильный агрегат и сталеразливочный ковш) без их реконструкции. При этом объем сталеплавильного агрегата используется полностью без уменьшения массы плавки. Экономический эффект, который может быть достигнут при реализации, складывается из увеличения объема производства жидкой стали и уменьшения эксплуатационных издержек.

Представленный процесс ковшового вакуумного рафинирования стали *VODF* конкурирует с процессом циркуляционного вакуумирования *RH*, приближаясь к нему по производительности и исключая его недостатки. Применение того или иного технологического варианта вакуумирования определяется, прежде всего, сортаментом выплавля-

емой стали, химического состава жидкого полупродукта и возможности выполнения ряда других технологических операций по маршруту внепечной обработки (раскисление, прецизионное легирование, десульфурация, доводка по температуре и гомогенизация). В таблице 2.1 представлена сравнительная характеристика установок внепечной обработки стали.

Таблица 2.1 – Сравнительная характеристика установок внепечной обработки стали [35]

процесс	RH			DH	CAS	VD-OD	LF
	OB	PB	PN				
схема							
раскисление	+	+	+	+	+	+	+
обезуглероживание	+	+	+	+	-	+	-
удаление водорода	+	+	+	+	-	+	-
десульфурация	-	+	+	-	-	+	+
нагрев	+	+	+	-	+	-	+
доводка по составу	+	+	+	+	+	+	+
удаление вclusions	+	+	+	+	+	+	+

Из таблицы 2.1 видно, что наиболее широкие показатели работы имеют установки циркуляционного RH и ковшевого VD-вакуумирования и вакуум-камера.

Сравнительный анализ эксплуатационных и металлургических характеристик циркуляционных и ковшевых способов вакуумирования приведен в таблице 2.2.

Применение RH-вакууматора требует более производительную (в 2 раза) вакуумную станцию, что и опреде-

ляет повышенное по сравнению с VD-установкой потребление рабочего пара.

Таблица 2.2 – Сравнение циркуляционных и ковшевых вакууматоров [35]

Показатель	Вакууматоры циркуляционного типа		Вакууматоры камерного типа	
	RH-OB	RH	VD	VODF
Масса вакуумируемого металла	100	100	85	100
Длительность обработки	100	108	140	118
Капитальные затраты	100	80	40-50	50 -70
Удельный расход огнеупоров	100	95	30	55
Удаление:				
углерода	Отлично	Отлично	Хорошо	Отлично
водорода	Среднее	Среднее	Отлично	Среднее
серы	Отсутствует	Отсутствует	Средне	Среднее
азота	Слабо	Слабо	Хорошо	Хорошо
включений	Среднее	Среднее	Среднее	Отлично

Примечание: за 100 % приняты характеристики вакууматора типа RH-OB.

Также из-за технологических особенностей, RH-процесс потребляет в 100 раз большее количество транспортирующего газа – аргона, чем требуется для эффективного перемешивания металла в ковше. При эксплуатации пароэжекторного насоса средняя оценочная стоимость вакуумирования тонны металла на RH-вакууматоре составляет 3,5–4,5 доллара и 1,5–2 доллара на VD-вакууматоре. При этом в рамках первичного анализа произведен учет расхода только непосредственно во время цикла вакуумирования. При эксплуатации RH-установки надо учитывать расходы на замену футеровки, прогрев футеровки и стоимость работ по обслуживанию комплекса вспомогательного оборудования RH-вакуум-камеры. Результаты расчета потребления энергосред при использовании вакуумных механических насосов на VD-процессе показывают, что обладая в 3–3,5 раза более высо-

кой ценой по сравнению с пароэжекторными насосами, механические вакуумные насосы обладают в 8–9 раз более низкой стоимостью эксплуатации. Средняя оценочная стоимость вакуумирования при эксплуатации механических насосов составляет 0,25–0,4 доллара за тонну. Сравнение вакуумных установок RH и VD/VOD показывает, что:

1) на RH-установке обработка металла осуществляется без участия шлака, а на установке VD/VOD – с активным рафинированием шлаком. Данное отличие играет определяющую роль при выборе «свободного борта» ковша. Рафинирование стали на RH-установке сопровождается значительным снижением температуры металла (до 8 °С/мин), а на установке VD/VOD падение температуры ниже и зависит от вместимости сталеразливочного ковша (от 2,0–2,5 °С/мин для 200 т сталеразливочного ковша до 4,5 °С/мин для 20 т сталеразливочного ковша);

2) скорость обработки стали на единицу времени выше на RH-установке, чем на VD/VOD, примерно на 50 %. Однако годовая производительность установок ограничивается коэффициентом готовности вакуумной камеры. Для RH-установки такой коэффициент составляет 80–85 % от общего рабочего фонда комплекса вакуумирования, в то время как камера VD/VOD обеспечивает 95–98 % готовности в течение цикла эксплуатации;

3) величина стартовых капиталовложений в RH-вакуум-камеру превосходит стоимость VD-вакуум-камеры в два раза. При этом стоимость годового обслуживания камеры VD типа ниже в десятки раз;

4) при производстве стали с особо низким содержанием углерода (типа IF) предпочтительнее использовать вакуумные RH-установки, а для производства стали смешанного сортамента целесообразнее применять VD-установки с непременной донной продувкой металла в сталеразливочном ковше аргоном [35].

В последние годы в России наблюдается интенсивный рост числа вакууматоров современных типов, что дает возможность ликвидировать отставание от ведущих зарубежных стран.

В настоящее время наибольшее распространение получили вакуумирование в вакуум-камере и циркуляционный вакууматор.

По технической сущности и достигаемым результатам предпочтение все чаще отдается циркуляционному вакуумированию, которое более дорогостоящее, и поэтому целесообразнее применять более дешёвое вакуумирование в вакуум-камере австрийской фирмы «СИМЕНС ФАИ», например, что позволит обеспечить:

- 1) глубокую дегазацию металла (удаление N_2 , O_2 , H_2);)
- 2) удаление неметаллических включений;
- 3) хорошее усреднение химического состава стали;
- 4) выравнивание температуры по всему объему;
- 5) корректировать состав стали благодаря подаче ферросплавов и флюсов.

Всё это достигается максимальной степенью рафинирования, благодаря выполнению следующих условий:

- создание максимального разряжения над жидким металлом;
- максимальная поверхность взаимодействия между металлом и вакуумом;
- достаточное время взаимодействия металла с вакуумом.

2.1.7. Тренд агрегатов комплексной обработки жидкой стали

Агрегаты комплексной обработки жидкой стали не без основания являются в настоящее время доминирующим трендом для внепечной её обработки инертными газами (аргоном, азотом и др.) и сыпучими порошкообразными материалами и используются для выполнения технологических операций по доведению жидкой стали до заданного нормативами химического состава и температуры после выпуска жидкого по фактической сущности полупродукта из дуговой сталеплавильной электропечи, в частности, с целью гарантированного получения стали заданного сортамента и высокого качества за счёт интенсификации дегазации металла и удаления неметаллических включений из него.

Известны конструкции агрегатов комплексной обработки жидкой стали (АКОС), включающие осуществление продувки металла в сталеразливочном ковше через футерованные фурмы и сопла под конусом защиты или устройства в днище ковша, а также через осевые отверстия в полых электродах. При продувке жидкой стали в сталеразли-

вочном ковше инертными газами через фурму с защитным конусом или сопла устройства в днище ковша на поверхности продуваемого металла образуется оголенная часть поверхности обрабатываемого металла от шлака, что является недостатком известных агрегатов АКОС. Для устранения этих недостатков при использовании в ковше футерованной фурмы через сопла под конусом защиты подают инертный газ (азот или аргон) на поверхность оголяемого из-под шлака металла, а для обеспечения более рассредоточенной подачи инертных газов в объем жидкого металла в ковше агрегата организуют подачу инертных газов не только через фурму с конусом и устройством в днище ковша, но и через осевые отверстия в трех полых электродах, установленных в своде агрегата над сталеразливочным ковшом [43–46 и др.]. Однако всё это не позволяет достигнуть высоких скоростей рафинирования жидкой стали от газов (кислорода, водорода и др.) и неметаллических включений (Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , CaO и др.), а также не обеспечивает высокую степень десульфурации жидкой стали на границе раздела шлак-металл с подогревом расплава от электрических дуг в торцах электродов вышеупомянутых агрегатов АКОС. Цель технического результата по устранению таких недостатков – повышение эффективности внепечной обработки жидкой стали в АКОС при использовании в агрегате комплекса вышеупомянутых методов и устройств для подачи инертных газов через днище ковша, фурму и полые электроды в своде агрегата АКОС за счёт продувки жидкого металла в ковше потоками инертного газа снизу с помощью устройства в

днище ковша и через осевые отверстия в полых электродах, установленных в своде агрегата. Такой конструктивно-технологический подход позволяет обеспечивать интенсивное перемешивание жидкого металла газовыми потоками в трех горизонтах ковша, т.е.:

- внизу у поверхности днища ковша;
- в середине объема ковша;
- сверху у поверхности металла или на поверхности границы раздела «шлак-металл».

Интенсивное перемешивание и движение слоев металла на разных горизонтах ковша позволяет достигнуть более высокой гомогенизации расплава по составу и температуре, интенсифицировать дегазацию металла и удаление неметаллических включений из него, а степень охлаждения жидкого металла от вдуваемых в него инертных газов при этом достигается регулировкой электродуговым подогревом металла и шлака в агрегате АКЭС, содержащем ковш с жидким металлом и шлаком, установленные в своде ковша три полых электрода и установленное в днище ковша устройство для продувки жидкого металла инертными газами, который снабжён закрепленной под сводом на корпусе ковша футерованной фурмой для продувки жидкого металла инертными газами с установленным в верхней ее части защитным конусом с соплами для подачи инертных газов на шлак вокруг упомянутой фурмы, при этом полые электроды установлены в отверстиях по центру свода ковша, а упомянутое устройство для продувки жидкого металла инертными газами размещено напротив упомянутой

фурмы в расположенном вне осей полых электродов пространства. Три полых электрода над сводом АКОС снабжены электрической подводкой к трансформатору и имеют устройство для подачи инертных газов и сыпучих материалов в жидкий металл через осевые отверстия упомянутых электродов. Полые электроды установлены с возможностью подачи струй инертного газа ниже границы раздела «шлак-металл». Торец футерованной фурмы размещен от днища сталеразливочного ковша на расстоянии более длины струи инертного газа, вытекающей из отверстия в торце фурмы (рисунок 2.19) [47].

После выпуска жидкой стали из дуговой печи, например, в сталеразливочный ковш (1), последний направляют на стенд агрегата ковш-печь. На стенде сталеразливочный ковш с устройством в его днище 2), жидким металлом (3) и шлаком (4) накрывают сводом (5) и опускают в него с помощью механизма электрододержателя (6) электроды (7) с включением электричества для электрического подогрева жидкого металла (3) и шлака (4) в сталеразливочном ковше (1). Через полые электроды (7) представляется возможным также подавать инертный газ (8) и необходимые сыпучие материалы в зону электрических дуг (9) на шлак (4) и жидкий металл (3). Нагрев металла и шлака электрическими дугами (9) осуществляется одновременно с подачей инертных газов (8), расход которых регулируется и осуществляется постоянно или периодически в соответствии с требованиями технологии внепечной обработки жидкой стали.

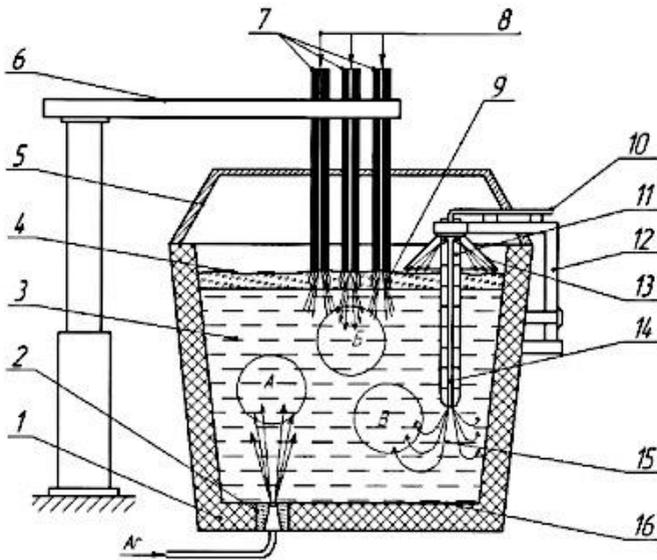


Рисунок 2.19 – Схема АКОС [47]:

1 – сталеразливочный ковш; 2 – днище ковша; 3 – жидкий металл; 4 – шлак; 5 – свод; 6 – механизм электрододержателя; 7 – электроды; 8 – инертный газ; 9 – зона электрических дуг; 10 – зона продувки жидкого металла; 11 – футерованная фурма; 12 – устройство продувки жидкого металла; 13 – защитный металлический конус; 14 – отверстие устройства продувки жидкого металла; 15 – струи газа; 16 – днище ковша

Продувка жидкого металла (10) инертными газами (аргоном или азотом) через футерованную фурму (11), закрепленную стационарно на корпусе ковша (12). Фурма (11) в верхней ее части имеет защитный металлический конус (13) с соплами для подачи струй инертного газа на шлак и металл вокруг фурмы (11). Для продувки металла через отверстие (14) в фурме подают инертный газ (10) для пере-

мешивания расплава струями газа (15) над днищем ковша (16). На рисунке 2.19 представлены области (А, Б, В) преимущественного воздействия потоков инертных газов на объемы жидкого металла в ковше. При этом АКОС, включающий в себя свод и ковш с жидким металлом и шлаком, три полых электрода в своде ковша, устройство в днище ковша и футерованную фурму с защитным конусом для продувки жидкого металла инертными газами, отличается от известных конструктивно-технологических решений тем, что футерованная фурма с защитным конусом закреплена на корпусе ковша под сводом, а устройство в днище ковша размещено напротив футерованной фурмы, но в пространстве вне осей полых электродов, которые расположены в отверстиях по центру свода ковша. Кроме того, АКОС отличается ещё и тем, что защитный конус фурмы имеет сопла для подачи инертных газов на шлак, причем защитный конус с соплами при этом размещен в верхней части фурмы под сводом в ковше. К тому же описываемый АКОС отличается также тем, что три полых электрода над сводом снабжены электрической подводкой к трансформатору и имеют устройство, позволяющее дополнительно осуществлять подачу инертных газов и сыпучих материалов в жидкий металл через осевые отверстия полых электродов, тогда как полые электроды размещены в шлаке с тем, чтобы струи инертного газа достигали поверхности металла ниже границы раздела «шлак–металл».

Одновременно АКОС имеет отличие в том, что торец футерованной фурмы размещен от днища сталеразливоч-

ного ковша на расстоянии большем длины газовой инертной струи, вытекающей из отверстия в торце фурмы.

Эффективность внепечной обработки металла в АКОС существенно возрастает при осуществлении рассредоточенной по трём зонам продувки расплава инертными газами. Экономический эффект при этом обеспечивается за счёт ускорения процессов перемешивания металла в зонах А, Б и В, интенсификации дегазации металла и удаления неметаллических включений, что приводит к уменьшению длительности режима продувки расплава в ковше, снижению удельного расхода электроэнергии и повышению показателей качества литых заготовок.

Контрольные вопросы

1. Какие задачи решаются при внепечной обработке стали?
2. Назовите основные способы вакуумирования жидкой стали.
3. Назовите главные особенности внепечной обработки жидкой стали.
4. Назовите главные цели технологии внепечной обработки жидкой стали.
5. Назовите простые и комбинированные способы внепечной обработки в обычном сталеразливочном ковше.
6. Что такое АКОС?
7. Какие задачи решаются при доводке стали на АКОСе?

Часть 3. КОМБИНИРОВАННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАВКИ И ДОВОДКИ СТАЛИ

3.1. Кардинальные изменения технологического процесса выплавки стали

Основными недостатками мартеновского способа выплавки стали являются [48]:

- большие энергетические затраты (тепловой КПД = 0,15–0,22);
- большой расход огнеупоров;
- большая длительность плавки (9–12 ч);
- ограниченные технологические возможности;
- большой объём ручного труда, не поддающийся механизации и автоматизации;
- неудовлетворительная экология.

Вышеупомянутые недостатки мартеновского способа выплавки стали явились основной причиной вывода мартеновских печей из эксплуатации с заменой их электродуговыми печами, в частности, несмотря при этом на общие достоинства разнообразных вариантов кислородно-конвертерных процессов по сравнению с мартеновским и электросталеплавильным процессами [49]:

- более высокая производительность имеет место у мартеновских и дуговых печей 100–150 т/ч, а у конвертера – 400–500 т/ч;
- более низкие капитальные затраты;
- не требуются внешние источники тепла;

- меньшие расходы по переделу, в число которых входит стоимость электроэнергии, топлива, огнеупоров, сменного оборудования и др.;

- высокая степень автоматизации и механизации производства, что улучшает условия труда и облегчает ведение процесса;

- ритмичность конвертерного процесса облегчает синхронизацию работы конвертера с установками непрерывной разливки стали (УНРС).

Высокие технико-экономические показатели кислородно-конвертерного процесса обусловили его бурное развитие и, в настоящее время, доля стали выплавляемой конвертерным способом превышает 65 % мирового объема выплавки стали даже с учётом его недостатков [49]:

- наличие высокотемпературной реакционной зоны;
- образование большого количества отходящего газа (величиной $\approx 70 \text{ м}^3/\text{т}$) с высокой концентрацией плавильной пыли;

- низкий выход годного вследствие повышенного угара примесей металлошихты, а также больших потерь металла с пылью (в отходящих газах, со шлаком и выбросами);

- ограниченные возможности переработки металлолома (обычно 22–28 % от массы металлошихты), обусловленные отсутствием внешних источников тепла;

- высокий удельный расход жидкого чугуна (более 800 кг/т стали), что связано, как с низким выходом годного, так и ограничениями по переработке металлолома.

Вместе с тем, в период 1960–1990 гг., произошли значительные изменения в конструкции электродуговых печей [48]:

- повышение мощности трансформатора в единичной производительности электродуговых печей;

- донный выпуск металла;

- внедрение водоохлаждаемых свода и стен;

- применение альтернативных источников тепла (природного газа, угольной и коксовой пыли, окатышей);

- интенсивная продувка кислородом,

которые обусловили ряд существенных преимуществ не только перед мартеновским, но и конвертерным процессом.

Электротермическое получение сталей называют высокозатратным в финансовом плане, но вполне эффективным. Эта методика призвана обеспечить сверхточный контроль качества путем регулировки химического состава, процесса окислительного рафинирования.

Электротермическая технология минимизации концентрации вредных элементов в стали

Суть метода в преобразовании электроэнергии в тепловую. Она осуществляется, в частности, в специальных дуговых печах со сферическим днищем (рисунок 3.1). Внутренняя поверхность оборудования облицовывается металлом. Устройство функционирует лишь при подключении к трёхфазной сети. Между электродом и металлом, подвергающимся плавке, возникает дуга, которая служит источни-

ком мощного притока тепла. Выделяются и другие особенности технологии:

- температурный режим 1650–2000 °С – гарантия высокоэффективной плавки проблемных шлаков;

- большая вместимость электродуговых печей – 3,5–400 т сырья;

- использование железной руды и скрапа (стальной лом) в качестве шихты;

- возможность выплавки высококачественных коррозионностойких, жаропрочных, строительных высоколегированных сталей с оптимальным содержанием вольфрама, молибдена, ванадия.

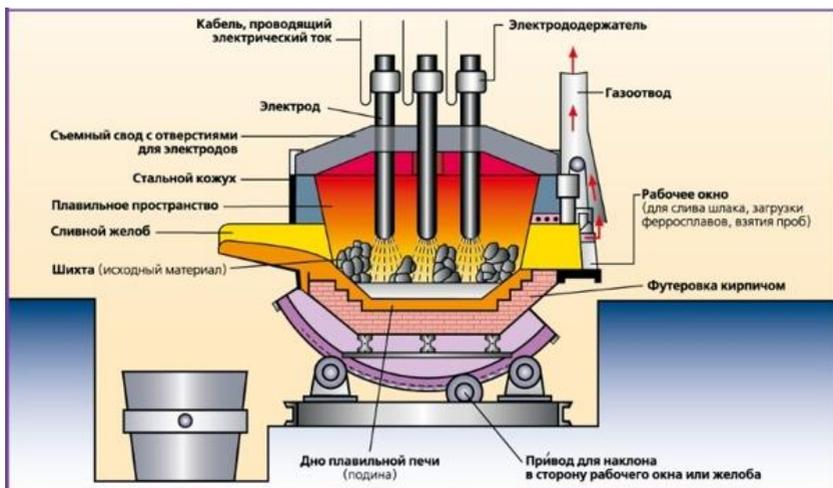


Рисунок 3.1 – Электродуговая печь [51]

Технологический процесс в электродуговой печи состоит из следующих операций: 1) заправки; 2) завалки; 3) расплавления; 4) рафинирования и выпуска стали [52].

Достоинства электродуговой печи:

- использование электрической энергии (электрического тока);
- возможность расплавить шихту (металлолом) практически любого состава;
- точное регулирование температуры металла и его химического состава.

Недостатки электродуговой печи:

- высокий местный перегрев под электродами;
- трудность перемешивания и усреднения химического состава чугуна;
- значительное количество продуктов горения и шума во время работы.

Дуговые сталеплавильные печи производят различные сорта высококачественных марок сталей – инструментальных, жаропрочных и др. Вместе с тем они не всегда отвечают повышенным требованиям к качеству конструкционных материалов. Следствием такого положения стало развитие специальных способов выплавки и доводки жидкой стали.

3.2. Плазменно-дуговые печи выплавки и доводки стали

Плазменно-дуговые печи (рисунок 3.2) работают, используя энергию плазмы. Плазма от других состояний вещества отличается тем, что большая или меньшая часть газовых молекул находится в ионизированном состоянии. Для выплавки сталей используется так называемая низкотемпературная плазма (10000–30000 °С) со степенью иони-

зации около 1 %. Плазму получают в специальных устройствах, называемых плазмотронами. Плазмотрон состоит из водоохлаждаемого корпуса с крышкой, катода с вольфрамовым наконечником и медного анода с отверстием в виде сопла.

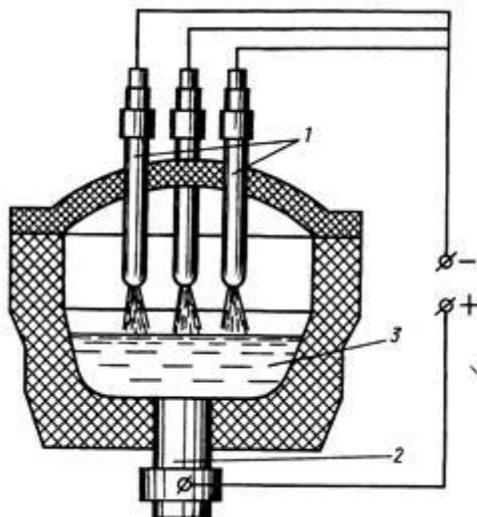


Рисунок 3.2 – Схема плазменно-дуговой печи [51]:

- 1 – плазмотроны;
- 2 – водоохлаждаемый электрод;
- 3 – жидкая сталь

В верхней части плазмотрона имеется отверстие для ввода плазмообразующего газа в пространство между катодом и корпусом. Плазмотрон подключают к источнику постоянного тока. Начало работы осуществляется зажиганием дуги между катодом и анодом, а затем подают газ. Струя газа вытекает из сопла, отрывает дугу от него и замыкает цепь на металле водоохлаждаемого кристаллизатора

(то есть фактически еще одного анода). После появления дуги между катодом и металлом из цепи выключается сопло-анод плазмотрона. Длина дуги горения может достигать 1–2 м. Высокая температура плазмы обеспечивает высокую скорость плавления и нагрева металла. А большая длина дуги при устойчивом горении независимо от обвалов шихты и всплесков жидкой стали способствует хорошей работе всего агрегата.

Плазменно-дуговые печи позволяют выплавлять особо низкоуглеродистые стали, так как в них нет угольных электродов. В печах создают нейтральную атмосферу (аргоновую), а это способствует удалению из стали азота и водорода.

Устройство плазменно-дуговых печей во многом аналогично устройству электродуговых печей. Вместо электродов в них устанавливают один или несколько плазмотронов, а в подину печи вставляют медный водоохлаждаемый электрод. Но печь делают более герметичной, чем обычная дуговая.

Плавку металла в таких печах чаще всего ведут методом переплава, хотя возможно проводить и окислительный период. Шихту подбирают чистой по сере и фосфору. После загрузки шихты и закрытия печи осуществляют промывку. Для этого через один из плазмотронов пропускают аргон, который тяжелее воздуха, поэтому вытесняет его из печи. Воздух выходит через специальные отверстия с образованиями, поднятыми плазмотронами. Затем плазмотроны опускают, включают ток и начинают плавление. Прожигают

колодцы в шихте (плавление идет очень быстро, так как обеспечивается высокая температура). После полного расплавления металл некоторое время выдерживают в печи для очистки от газов, при необходимости вводят раскислители и легирующие, затем выпускают металл.

3.3. Вакуумно-дуговые печи

В связи со стремительно растущим спросом на стали и сплавы особого назначения для авиационной, аэрокосмической, энергетической и атомной промышленности, где требуются все более высокие значения по чистоте металла и его прочностным параметрам, все большее применение находят производства, основанные на применении специальных переделов. С целью решения задач по повышению качества металла предложено оборудование и технологии для достижения высоких требований, предъявляемых к сталям и сплавам с особыми технологическими свойствами, путем уменьшения вредных примесей, газов и неметаллических включений.

К таким инновационным способам можно отнести технологии выплавки в вакуумно-дуговой печи (ВДП), позволяющей получать стали и сплавы нового поколения высокой степени чистоты, микроструктурной однородности, так называемые сверхчистые сплавы и суперсплавы.

Вакуумно-дуговые печи (рисунок 3.3) применяются для производства особо качественных стальных отливок.

В ВДП используется специально изготовленная шихта, предварительно выплавленная в открытых печах. Сами

ВДП имеют сложное и дорогое оборудование, невысокую производительность. Такая сталь стоит в 3–5 раз дороже стали, производимой традиционными технологиями.

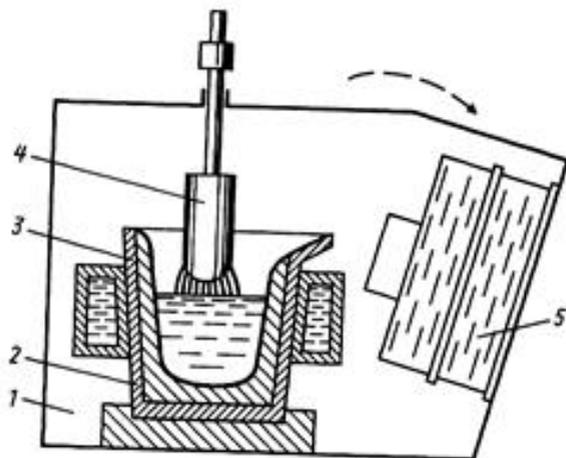


Рисунок 3.3 – Схема вакуумно-дуговой печи [51]:

- 1 – вакуум-камера; 2 – плавильная печь; 3 – гарнисаж;
- 4 – расплавляемый электрод; 5 – литейная форма

Используют её для отливки деталей особо ответственного назначения, применяемых в энергетике, авиа-, авто-, корабле-, ракето-, приборо-, машиностроении, химической и других отраслях промышленности.

Вакуумно-дуговые печи работают обычно с расходным электродом, который изготовлен из металла выплавляемой марки стали. Исключение составляют стали, содержащие легко испаряющиеся элементы, количество которых в заготовке (электроде) на 20–25 % должно быть выше, чем в готовой стали. Для переплава применяют дуговые печи на постоянном токе. Остаточное давление в вакуумной камере

0,1–1,0 Па. ВДВ имеет водяное охлаждение и позволяет осуществлять заливку литейной формы в вакууме. Металл, выплавленный в такой печи, имеет минимальное содержание газов и примесей цветных металлов (цинк, свинец, висмут и др.).

Для откачки атмосферного воздуха дуговые печи оснащаются вакуумными насосами с бустерным и форвакуумным принципом действия, которые предусматривают наличие системы воздушной фильтрации для предотвращения попадания пылевых частиц при нагнетании воздушного потока.

Особенности конструкции электропечей ВДП [57]:

- коаксиальная конструкция печи;
- возможность производить как переплав прессованных электродов, так и переплав слитков;
- исполнение печи с предохранительным клапаном от избыточного давления;
- система стабилизации дуги позволяет избежать искажения магнитных полей в зоне дугового разряда, что способствует стабилизации горения дуги и предотвращает ее переброс на стенку кристаллизатора;
- механизм перемещения электрода оборудован токопроводящим штоком, перемещающийся при помощи винтовой пары «винт–гайка» с электромеханическим приводом (частотный двигатель переменного тока и серводвигатель);
- энкодер для точного определения положения электрода в процессе плавки сохраняет данные о положении электрода;

- токопроводящий шток с внешней части выполнен из хромированной углеродистой стали, а внутренняя водоохлаждаемая часть выполнена из высококачественной меди;
- система электронного взвешивания электрода (используются высокоточные прецизионные датчики с температурной компенсацией и электроэкранированием – производство НВМ Германия) позволяет быстро измерить скорость плавки по расходуемым электродам;
- устройство центровки электрода (регулировка по осям X–Y) применяется для регулировки соосности между гильзой кристаллизатора, плавильным постом, штоком, уплотнениями между подвижными соединениями;
- кристаллизатор состоит из медной гильзы, оснащенной водяной рубашкой, по внешней окружности которой стоит соленоид для стабилизации дуги;
- процесс плавки управляется при помощи компьютера в соответствии с заданной программой;
- автоматизированная система контроля плавки (на базе платформы SIEMENS);
- источник питания включает преобразовательный трансформатор, обеспечивающий требуемое напряжение постоянного тока, и выпрямительный блок на базе IGBT-модулей или SCR-тиристоры;
- система охлаждения электропечи с замкнутым бесконтактным контуром охлаждения, что позволяет предотвратить попадание пыли и образование солей. Работа в автоматическом режиме с постоянным контролем температуры.

3.4. Вакуумно-индукционные печи

Вакуумно-индукционные печи применяются при производстве сплавов, которые должны плавиться в вакууме, т.к. легко вступают в реакцию с атмосферным кислородом. Плавка в вакууме позволяет предохранять расплавляемый металл от взаимодействия с окружающей средой. Вакуумирование плавильного пространства позволяет значительно улучшить механические и литейные свойства высоколегированных сталей, специальных сплавов, которые из-за наличия легкоокисляемых элементов склонны к образованию значительного количества оксидных пленок. При вакуумной плавке концентрация примесей в жидком металле понижается за счет прохождения такого процесса, как, например, дегазация, если концентрация газов, растворенных в металле, зависит от давления окружающей среды.

Технология подходит для получения высокочистых металлов в бескислородной атмосфере. Вакуумно-индукционная печь (рисунок 3.4) позволяет проводить эффективную дегазацию расплава, перемешивание расплава, точное регулирование состава сплава и температуры.

Вакуумная печь для индукционной плавки – это система, включающая в себя герметичную камеру, в которой устанавливаются индукционная тигельная печь и в ряде случаев литейная форма. Основополагающий процесс для большинства всех производителей высоколегированных сплавов – вакуумная индукционная плавка, которая особенно хорошо подходит для плавки и получения литья из железа, черных металлов, никеля, кобальта и их сплавов в

вакууме и контролируемой атмосфере для удовлетворения требований промышленного производства. Когда качество материала чрезвычайно важно, конструкция вакуумных печей для индукционной плавки и литья позволяет легко и быстро достигать необходимых результатов, обеспечивая заказчиков продукцией необходимого качества.

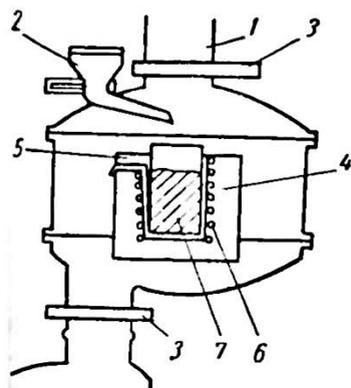


Рисунок 3.4 – Схема вакуумной индукционной печи [60]:
1 – загрузочная камера; 2 – дозатор; 3 – затвор; 4 – тигель;
5 – пивной носок; 6 – индуктор; 7 – металл

Преимущества вакуумной плавки с индукционным нагревом заключаются в следующем [60]:

- возможность длительной выдержки жидкого металла в глубоком вакууме;
- высокая степень дегазации металлов;
- возможность дозагрузки печи в процессе плавки, активного воздействия на интенсификацию процессов раскисления и рафинирования в любой момент плавки;

- возможность эффективного контроля и регулирования состояния расплава по его температуре и химическому составу в течение всего процесса;

- особая чистота получаемых отливок за счет отсутствия любых неметаллических включений;

- возможность производить быстрый нагрев (прямой нагрев за счёт тепла, выделяемого в расплаве), а следовательно, высокая скорость плавок и производительность;

- высокая гомогенность расплава за счет активного перемешивания металла;

- произвольная форма сырья (кусковые материалы, брикеты, порошок и т. д.);

- высокая экономичность и экологическая чистота.

В зависимости от типа металла и металлургического процесса глубина вакуума для процесса рафинирования возгонкой может находиться в диапазоне 10^{-1} – 10^{-3} мбар.

Материалы, выплавленные в вакуумной индукционной печи (ВИП), должны пройти дополнительный переплав и (или) процесс направленной кристаллизации. Для этого ВИП снабжают дополнительными разливочными камерами. Для обеспечения еще более жестких требований материалы должны пройти несколько этапов рафинирования, как, например, в триплексном процессе переплава, состоящем из последовательных процессов индукционно-вакуумного переплава, электрошлакового переплава и дугового или лучевого вакуумного переплава. Выплавка металла в вакууме осуществляется в закрытых индукционных печах (рисунок 3.5).

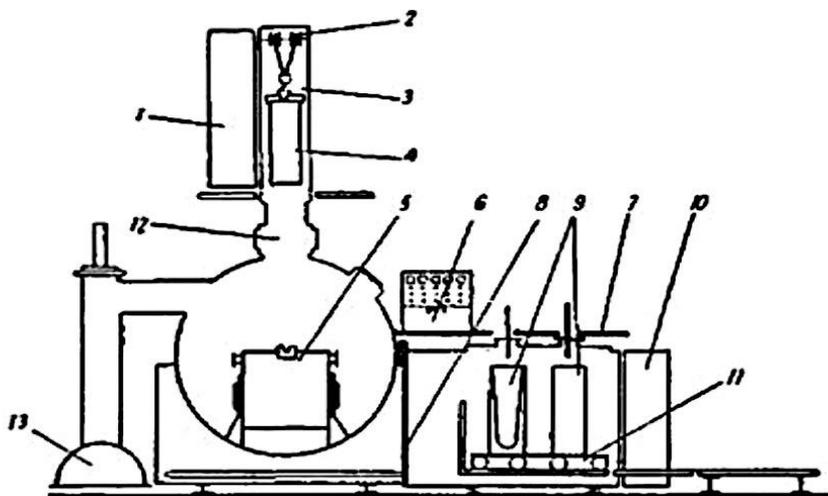


Рисунок 3.5 – Схема устройства вакуумно-индукционной печи [60]:

- 1 – дверь; 2 – подъемник; 3 – загрузочная камера; 4 – загрузочная корзина; 5 – индукционная печь; 6 – пульт управления; 7 – электроды; 8 – внутренняя дверь; 9 – изложницы; 10 – дверь; 11 – тележка; 12 – вакуумная задвижка; 13 – вакуумные насосы

Вакуумно-индукционная печь – современная печь нового поколения полунепрерывного действия, созданная на основе передовых технологий. Печь предназначена для плавки и рафинирования стали (спецсплавов) в вакууме ($6.67 \cdot 10^{-3}$ Па). Вакуумная индукционная плавка позволяет проводить эффективную дегазацию расплава.

Компания «MAGMATEX» поставляет стандартную линейку вакуумно-индукционных печей VIM-10, VIM-25, VIM-50, VIM-100, VIM-200, VIM-500 с трехуровневой вакуумной системой и автоматической системой управления.

Преимущества технологии VIM [57]:

- удаление растворенных газов (кислорода, водорода, азота);

- плавление в бескислородной атмосфере, ограничивающее появление неметаллических оксидов и предотвращающее окисление активных элементов;

- удаление нежелательных элементов с высокой упругостью паров;

- получение очень точного и однородного химического состава, и температуры плавки;

- низкий уровень загрязнения окружающей среды пылью;

- высокий уровень безопасности при эксплуатации;

- высокая надежность и производительность.

Особенности конструкции печи VIM:

- в конструкции печи использованы передовые импортные технологии;

- среднечастотный тиристорный преобразователь (ТПЧ) имеет полностью интегрированный тип, быстродействующую систему защиты;

- в системе охлаждения использованы паровые износоустойчивые резиновые шланги, выдерживающие температуру до 150 °C

- используются гелиевые датчики разгерметизации для контроля коэффициента повышения давления;

- применяется новейший цифровой вакуумметр, осуществляющий многочисленные измерения вакуума на конуре;

– программируемый контроллер PLC + операционная система промышленного компьютера.

Конструкция вакуумно-индукционной печи

Корпус вакуумной камеры индукционной печи: двухслойный с водяным охлаждением из специальной стали SUS304. Вакуумная герметизация обеспечивается «О»-образным кольцом. Корпус оснащен установкой водяного охлаждения (предотвращает старение «О»-образного кольца). На корпусе вакуумной камеры расположен соединительный трубопровод вакуумной системы. Внутри подина оборудована разливочной платформой или отверстием. Во время разлива печь поворачивается с помощью привода, расположенного снаружи камеры.

Индуктор вакуумной печи изготовлен из высококачественной бескислородной электротехнической меди TU1 квадратного сечения с водяным охлаждением. В конструкции вакуумных индукционных печей VIM-10, VIM-25, VIM-50, VIM-100, VIM-250, VIM-5 использован индуктор немецкой фирмы Leybold.

Крышка вакуумной индукционной печи: двухслойная с водяным охлаждением, внутренняя стенка выполнена из специальной стали SUS304. Крышка печи оснащена установкой водяного охлаждения, смотровым окном, блокировочной установкой.

Печь оснащена мощным среднечастотным тиристорным преобразователем мощности, спроектированным на базе тиристоров нового поколения, высокоскоростными датчиками тока и напряжения, обеспечивающими высокую

надежность, помехоустойчивость и многофункциональность.

Система водоохлаждения вакуумной печи делится на три части: система охлаждения среднечастотного преобразователя, система охлаждения корпуса печи, индуктора и вакуумной системы.

Вакуумная система как правило состоит из механического насоса с электромагнитным пневматическим клапаном перепада давления (предотвращает утечку масла вакуумного насоса), насоса Рутса, подпитывающего насоса, пневматических клапанов, клапана подачи воздуха, клапана сброса воздуха, вакуумного трубопровода, гофрированных труб. Уровень вакуума измеряется при помощи цифрового комбинированного вакуумметра. Используются передовые гелиевые датчики разгерметизации для измерения коэффициента повышения давления, что гарантирует достоверность и точность технических показателей. Для соединения насосов и вакуумного трубопровода использовано быстрое соединение металлическими гофрированными трубами (снижает вибрацию). Уровень вакуума измеряется цифровым вакуумметром. Компания MAGMATEX использует передовые гелиевые датчики разгерметизации для измерения коэффициента повышения давления, что гарантирует достоверность и точность технических показателей.

3.5. Плазменно-дуговой переплав

В отличие от обычного дугового нагрева плазменно-дуговой переплав (ПДП) обеспечивает [58]:

- нагрев и плавление металла с более высокими скоростями;

- существенное упрощение процесса регулирования длины дуги и устранение сложного оборудования для перемещения электродов;

- создание над металлом атмосферы требуемого состава и свойств;

- исключение возможности науглероживания металла;

- устранение шумового эффекта дуги;

- возможность горения дуги в условиях изменения давления в широких пределах.

Нагрев и плавление металлов с помощью тепла, выделяемого сжатой в поперечном направлении электрической дугой, называют плазменно-дуговой плавкой. В отличие от обычного дугового разряда с температурой столба дуги 6000–8000 °С сжатие дуги газовым потоком или магнитным полем увеличивает плотность тока, повышает степень ионизации частиц и обеспечивает повышение ее температуры до 10000–30000 °С. Сжатую высокотемпературную дугу получают при помощи специальных устройств – плазматронов. В используемых в металлургии плазматронах сжатие дуги осуществляют потоком газа.

Плазматрон плазменно-дуговой печи (рисунок 3.6) состоит из корпуса, электрододержателя, сопла, электрода и водоохлаждаемого кожуха. Внутри корпуса на изоляционных втулках закрепляют электрододержатель в виде водоохлаждаемого штока с наконечником для крепления к верхней части токоподводящих шин и вмонтированным в

нижнюю часть съёмным вольфрамовым электродом. Внизу к корпусу через уплотнительное кольцо крепят медное съёмное водоохлаждаемое сопло.

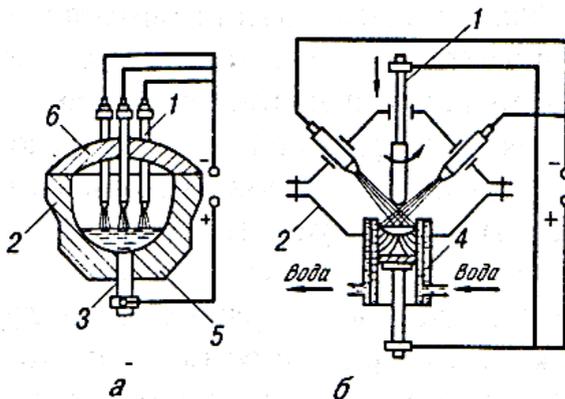


Рисунок 3.6 – Схема плазменно-дуговой печи с керамическим тиглем (а) и водоохлаждаемым кристаллизатором (б) [58]:

- 1 – плазматрон; 2 – герметичная плавильная камера;
- 3 – подовый электрод; 4 – кристаллизатор; 5 – футеровка печи; 6 – свод печи

Зажигание плазменной дуги осуществляют следующим образом. В начальный момент с помощью осциллятора возбуждают дежурную дугу между катодом и соплом плазматрона, к которому на время возбуждения дуги подводят положительный потенциал, а затем через сопло подают рабочий газ. Истекая из плазматрона, газ отрывает дугу от сопла (анода) и замыкает цепь между электродом плазматрона (катодом) и поверхностью нагреваемого металла, являющегося анодом. При загорании дуги между катодом плазматрона и нагреваемым металлом сопло отклю-

чают и плазматрон поднимают, растягивая сжатую газовым потоком дугу до требуемой длины (1–2 м).

Плазменную дугу используют в сталеплавильных печах двух типов – плазменно-дуговых с керамическим тиглем и установках плазменного переплава заготовок в водоохлаждаемом кристаллизаторе.

Плазменная печь с керамическим тиглем (ПП) является разновидностью обычной дуговой печи, в которой вместо графитизированных электродов устанавливают один или несколько плазматронов, а кожух, свод, сливное отверстие и рабочее окно выполняют герметичными, и для подачи напряжения на нагреваемый металл в подину встраивают подовый электрод (рисунок 3.6, а).

Работающие плазменные печи с керамическим тиглем являются результатом реконструкции дуговых печей емкостью 5–10 т. Плазматроны ПП с огнеупорной ванной работают на постоянном токе прямой полярности – катодом служит верхний водоохлаждаемый плазматрон, а анодом – ванна. От брызг металла и шлака катод защищен медным водоохлаждаемым соплом.

Находящийся в контакте с металлом подовый электрод обычно изготавливают водоохлаждаемым из меди. Ведутся работы по замене таких электродов на более надежные металлокерамические.

Плазменную дугу успешно используют как источник нагрева в установках рафинирующего переплава расходных металлических электродов на слитки в медных водоохлаждаемых кристаллизаторах. Разработанная институтом

электросварки им. О.Е. Патона печь плазменно-дугового переплава (ПДП) для получения слитков массой до 5 т из жаропрочных, нержавеющих и конструкционных сталей состоит из плавильной камеры, плазматронов, кристаллизатора, механизма вытягивания слитка и питающей энергосистемы (рисунок 3.6, б).

Плавильную камеру ПДП изготавливают из двух конусов. К верхнему – крышке камеры – крепят через изоляторы камеру расходуемой заготовки с механизмом подачи и патрубки для радиальных плазматронов и датчика уровня ванны. Нижний конус снабжают фланцем для установки плиты кристаллизатора и камеры слитка с механизмом его вытягивания и разгрузки, а также патрубками для смотровых систем визуального контроля процесса переплава, установки механизма подачи флюса и вакуумпровода.

Из укороченного водоохлаждаемого кристаллизатора (два медных пояса и один стальной) слиток вытягивают в камеру слитка токоведущим штоком. Подъем и опускание камеры со слитком ведут с помощью гидропривода.

Расходуемый литой или кованный электрод из стали (сплава) определенной марки соединяют с водоохлаждаемым штоком, закрепленным верхним концом в траверсе телескопической стойки, перемещающейся вверх и вниз от электромеханического или гидравлического привода.

Через уплотнители и изоляторы в верхней камере устанавливают плазматроны. Шестиплазматронную установку питают трёхфазным током промышленной частоты. При этом плазматроны объединяют в два блока (по три в

каждом) с питанием от отдельных силовых трансформаторов. Для стабилизации температуры электродных пятен в цепь «плазматрон–ванна» от выпрямителя подают дополнительно постоянную составляющую силы тока. Цепь между плазматронами замыкают по ванне кристаллизатора. Перед плавлением расходующую заготовку устанавливают в плавильную камеру, затем ее герметизируют и заполняют соответствующим газом (аргоном, гелием, азотом). Расход газа на промывку камеры составляет $\approx 12 \text{ м}^3$. Заготовку опускают до упора в затравку кристаллизатора, включают плазматроны и наводят жидкую ванну. Затем включают механизм вытягивания слитка из кристаллизатора.

При установившемся режиме переплава массовая скорость плавления заготовки равна массовой скорости кристаллизации слитка. Заготовка плавится под действием тепла плазменных дуг, тепловой энергии от тока, проходящего через анод (при подключении к источнику питания) и отраженного тепла жидкой ванны и плазменных струй. Образующаяся при этом на торце электрода пленка жидкого металла и стекающие в кристаллизатор капли взаимодействуют с атмосферой печи и рафинируются.

Слитки ПДП имеют плотную макроструктуру и хорошую поверхность, не требующую обработки перед прокаткой и ковкой. Мелкая ванна в слитке ПДП приводит к практическому отсутствию в его головной части усадочной раковины и рыхлости. Он имеет периферийную зону мелких кристаллов и зону крупных, перпендикулярных оси ориентированных кристаллов. Зона равноосных кристаллов в

центре слитка отсутствует. В печах ПДП сталь легируют азотом до концентраций, в 2–3 раза превышающих его обычную равновесную растворимость в ней, так как скорость поглощения азота металлом из газовой фазы на порядок выше, чем во всех других плавильных агрегатах. Это позволяет отказаться от использования для легирования стали азотсодержащих ферросплавов – феррохрома, ферромарганца, феррованадия и др.

Процесс рафинирования в установках ПДП приближается к процессу ЭЛП, поскольку он позволяет регулировать скорость кристаллизации слитка, поддерживать высокий температурный уровень ванны в кристаллизаторе, обеспечивать низкое парциальное давление выделяющихся газов и примесей.

ПДП отличается от электронно-лучевой плавки (ЭЛП) простотой конструкции установки, отсутствием сложного высоковольтного оборудования и более высокой производительностью. По возможностям рафинирования расплава от летучих примесей цветных металлов процесс ПДП уступает ЭЛП.

3.6. Электронно-лучевой переплав

Установка электронно-лучевого переплава (ЭЛП) действует так, что исходная металлическая шихта подвергается бомбардировке со стороны пучка высокоэнергетических электронов, в результате чего происходит расплавление металла и заполнение им медного водоохлаждаемого кристалли-

затора. Состав установки ЭЛП представлен электронной пушкой (рисунок 3.7) [61].

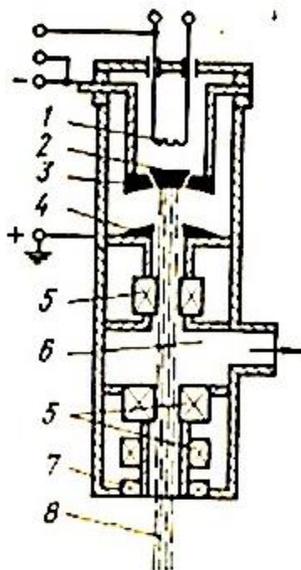


Рисунок 3.7 – Схема электронно-лучевой аксиальной пушки [61]:

- 1 – вспомогательный электрод (катод); 2 – основной катод;
- 3 – фокусирующий электрод; 4 – анод; 5 – магнитные линзы;
- 6 – отсос газа; 7 – отклоняющая система; 8 – электронный пучок

Нагрев дискового массивного вольфрамового катода осуществляется вследствие того, что он подвергается бомбардировке при помощи исходящих от вспомогательного катода электронов. Для этого требуется создание между основным и вспомогательным катодами разницы потенциалов в 3–5 кВ. Наложение разности потенциалов происходит также между анодом и основным катодом, в результате чего движение электронов, под воздействием термоэмис-

сии вырывающихся их основного катода, становится направленным.

Для фокусировки электронного пучка используется некая форма поверхности катода, фокусирующий электрод, а также система магнитных линз, представленная катушками с проходящим по ним током. Чтобы расплавление шихты было равномерным, происходит перемещение электронного пучка по поверхности шихты.

В случае с электронно-лучевым переплавом важная роль отводится тому, чтобы выбрать диаметр пятна электронов, падающий на расплавленный металл. Если пятно будет слишком сфокусированным, заготовка частично испарится, минуя стадию расплавления. Если диаметр кристаллизатора равен 800 мм, то оптимальное значение диаметра пятна достигает 180 мм.

Состав установки ЭЛП представлен одной или сразу несколькими электронными пушками. Рисунок 3.8 позволяет ознакомиться со схемой установки ЭЛП, на которую осуществляется боковая подача проплавленной заготовки. Далее осуществляется фокусировка электронного пучка от пушки на заготовке. После этого происходит стекание расплавленного металла на кристаллизатор, внутри которого осуществляется наплавка слитка.

По мере того, как совершается наплавка, происходит вытягивание слитка вниз. Величина остаточного давления при плавке составляет 1,3–0,13 сПа (10^{-4} – 10^{-5} мм рт. ст.). Чтобы сформировать вакуум, камера печи дополняется системой вакуумирования.

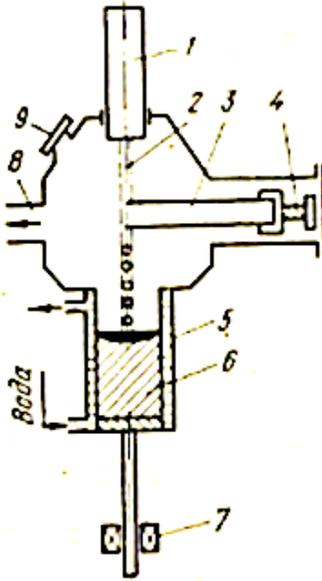


Рисунок 3.8 – Установка ЭЛП [61]:

- 1 – электроннолучевая пушка; 2 – электронный пучок;
 3 – переплавляемая заготовка; 4 – механизм подачи заготовки; 5 – кристаллизатор; 6 – наплавляемый слиток; 7 – механизм вытягивания слитка; 8 – отсос газа; 9 – гляделка

Разработкой высокопроизводительных установок ЭЛП занимается Институт технической физики в ФРГ. Одна из используемых в этом институте установок ЕМО-6000 может осуществлять выплавку слитков, масса которых составляет 100 тонн. Для подачи заготовок могут быть использованы боковые шлюзы. Размер ускоряющего напряжения в пушке достигает отметки в 30 кВА, а показатель анодной силы тока – 250 А. При этом пятно электронного пучка может иметь диаметр в пределах от 100 до 800 мм. Также для

электронного пучка характерно наличие запрограммированного отклонения по синусоидальной кривой на поверхности ванны.

В случае наличия на установке ЭЛП двух электронных пушек функция одной из них сводится к расплавлению заготовки, а второй – к нагреву металла в кристаллизаторе.

Среди ключевых технологических преимуществ электронно-лучевого передела следует отметить следующее:

- можно с большим диапазоном осуществлять регулировку температуры, следовательно, появляется возможность регулировать то, как металл пребывает в жидком состоянии;

- в результате того, что отсутствует дуга, можно создавать глубокий вакуум 1,33 мПа.

Но использование ЭЛП приводит к более высокому расходу энергии, также глубокий вакуум и применение высоких температур приводит к тому, что металл значительно испаряется. Кроме того, установка ЭЛП является более сложной в эксплуатации, чем ВДП.

Требуется экономическое обоснование установки ЭЛП, принимая во внимание требования, связанные с качеством металла, а также возможностью выполнить их, используя ЭЛП и ВДП.

Во время подачи заготовок в пределах установок, у которых есть шлюзы под переплавляемые заготовки, можно не нарушать вакуум в рабочей камере. В данной ситуации последняя операция может быть осуществлена только в том случае, когда слиток извлечен из кристаллизатора.

Качество наплавляемого слитка во многом зависит от того, насколько правильно будет выбрана схема развертки электронного пятна, поскольку это оказывает влияние на то, чтобы были созданы оптимальные для кристаллизации условия. Для определения температуры поверхностных слоев металла в кристаллизаторе используется удельная плотность подводимой энергии, а также скорость его плавления. На то, как температура будет распределена по поверхности выплавляемого металла, влияние оказывает характер развертки луча.

Основная причина рафинирования металла заключается в том, что примеси проходят процедуру дегазации и испаряются с открытой поверхности жидкого металла, что приводит к всплыванию неметаллических включений. Во время испарения металла удаляются нежелательные цветные металлы, а также происходит эффективное снижение концентрации азота. Однако при этом происходит и испарение легирующих элементов. Для определения скорости испарения используется температура поверхности ванны.

Если температура будет сравнительно низкой, то потери, связанные с испарением, будут составлять 2–4 %, возрастание температуры приводит к их росту до 5–7 %, а неправильный режим и вовсе приводит к испарению > 10 %.

К примеру, многопушечная установка ЭЛП, отличается меньшим испарением в сравнении с однопушечной. Объясняется это тем, что у многопушечной температура по поверхности металла в кристаллизаторе распределяется

более равномерно. Но многопушечные установки также отличаются более низкой степенью рафинирования металла.

Вакуумные установки ЭЛП обеспечивает рафинированный переплав кремния и тугоплавких металлов.

Электронно-лучевая плавка – рафинирующий переплав тугоплавких металлов или высоколегированных сталей в электронно-лучевых печах. Электронно-лучевая плавка обеспечивает высокую чистоту переплавленного материала, а также однородность его структуры.

Низкое давление в плавильной камере и широкие возможности регулирования мощности и ее распределения на поверхности переплавляемого металла выгодно отличает установки ЭЛП от других видов нагрева.

Электронно-лучевое плавление отличается превосходной способностью к рафинированию и предлагает высокую гибкость относительно источника нагрева и распределения мощности. Поэтому оно является идеальным для переплава и рафинирования металлов и сплавов в высоком вакууме в водоохлаждаемых медных кристаллизаторах без использования керамики.

На сегодняшний день процесс ЭЛП используется для производства тугоплавких и активных металлов (тантал, ниобий, молибден, вольфрам, ванадий, гафний, цирконий и титан), а также их сплавов. Он играет важную роль в получении сверхчистых материалов для мишеней ионного распыления и сплавов для электронной промышленности, а также в переработке титанового лома.

Компания ALD поставляет решения для комплектного оборудования, включая систему пушек в конфигурации для различных процессов [62]:

1. Электронно-лучевые производственные установки для капельной плавки.
2. Электронно-лучевые установки с промышленной ёмкостью для рафинирования.
3. Электронно-лучевые установки для пилотного производства.
4. Электронно-лучевые лабораторные установки.
5. Электронно-лучевые установки для выплавки таблеток.
6. Электронно-лучевые установки для зонной плавки.

Объем поставки не ограничивается поставкой оборудования, т.к. компания ALD может включать работы от шеф-монтажа до монтажа под ключ, а также технологическую поддержку со стороны специалиста компании ALD.

Металлургия электронно-лучевой плавки

Электронно-лучевая пушка представляет собой источник нагрева высокой мощности, который позволяет достичь в точке фокусировки луча температуры плавления и даже испарения всех материалов. Благодаря магнитной развертке и быстрому сканированию на высоких частотах электронный луч может эффективно направляться на цели различной формы и тем самым является наиболее гибким источником нагрева в технологии переплава.

Электронный луч ударяется о цель со стандартной плотностью энергии в 100 Вт/см^2 . В зависимости от свойств

плавящегося материала коэффициент передачи мощности составляет от 50 % до 80 %.

Поскольку ЭЛП является методом нагрева поверхности, он позволяет достичь только малой глубины расплава при подходящей скорости плавления, что положительно влияет на структуру слитка относительно пористости, образования ликваций и т. д.

Благодаря тому, что перегретая поверхность расплава подвергается воздействию высокого вакуума в диапазоне 1–0,0001 Па, это приводит к отличной дегазации расплавленного материала.

Металлические и неметаллические включения с упругостью пара выше, чем у основного материала могут выборочно испаряться при перегреве расплава, что создает желаемую высокую чистоту материала слитка.

Быстрое сканирование луча по поверхности расплава помогает избежать локального перегрева и на сегодняшний день делает возможным унифицированное производство сплавов методом электронно-лучевого плавления, в особенности в титановой промышленности.

Варианты электронно-лучевого процесса

Высокая гибкость электронно-лучевого источника нагрева привела к развитию нескольких способов переплава и рафинирования используемых в установках от лабораторных до больших промышленных систем.

1. Вертикальная и горизонтальная плавка скапыванием. И тот и другой вид плавки являются классическим способом для производства тугоплавких металлов, например, тантала

и ниобия. Плавильный материал в виде прутков обычно загружается горизонтально и плавится напрямую в кристаллизатор с вытяжным дном. Жидкий расплав находится по верхнему краю кристаллизатора благодаря вытяжке нижней части растущего слитка. Рафинирование основано на дегазации и выборочном испарении, как описано выше. В большинстве случаев для получения конечного качества требуется переплав первого слитка. Для повторного переплава электрод загружается вертикально при постоянном вращении.

2. Электронно-лучевое рафинирование с промышленной ёмкостью (EBCNR). Данный процесс имеет огромное значение для производства и повторной переработки химически активных металлов, особенно титана. Плавильный материал плавится скапыванием в плавильной зоне водоохлаждаемой медной промышленной ёмкости, откуда он стекает в зону рафинирования и, наконец, переливается в вытяжной кристаллизатор. При правильном выборе размера установки промышленной ёмкости расплавленный материал протекает по ней с определенной задержкой, что делает возможным эффективное гравитационное отделение включений высокой плотности (HDI) и удаление из материала включений низкой плотности (LDI) дополнительно к механизмам рафинирования, указанным выше. Размер установки промышленной ёмкости и кристаллизатора, а также скорость плавления зависят от количества электронно-лучевых пушек, обеспечивающих мощность плавления и распреде-

ления энергии по площади промышленной ёмкости и кристаллизатора.

3. Лучочная плавка используется для определения чистоты образцов из жаропрочных сплавов по неметаллическим включениям высокой и низкой плотности. Оборудование включает автоматическое плавление образцов по запрограммированному рецепту и контролируемую направленную кристаллизацию. Включения низкой плотности – оксиды всплывают на поверхность расплава и концентрируются в центре сверху закристаллизовавшегося образца.

4. Зонная плавка используется для производства материалов самой высокой степени чистоты. Небольшая область подвешенного вертикально электрода расплавляется в кольцевом катоде. За счет различной растворимости примесей в твердой и жидкой фазе основного материала примеси переносятся посредством направленного движения расплавленной зоны к концу электрода.

Контроль процесса ЭЛП

Установки ЭЛП компании ALD работают в полуавтоматическом режиме. Автоматизация процесса включает:

- системы вакуумных насосов и водоохлаждения;
- контроль давления;
- скорость подачи материала и скорость вытяжки слитка;
- контроль высокого напряжения и тока эмиссии.

Автоматическое распределение мощности луча, сбор и архивирование данных

Для распределения мощности по условиям конкретного процесса развертка луча контролируется по располо-

жению и времени задержки. Компания ALD разработала компьютерную систему сканирования и управления электронным лучом “ESCOSYS” для одновременного контроля нескольких пушек. Данная система отвечает высочайшим требованиям к сложному распределению мощности, которое определяется в рецептах плавки выбором подходящих образцов развертки из ряда заданных форм. Частью пусконаладки установки является специальное обучение, во время которого адаптируется зависимость геометрии плавки от частоты развертки электронно-лучевой пушки. Тем самым распознается выход электронного луча за пределы кристаллизатора и автоматически блокируется при редактировании образцов развертки.

Электронно-лучевые пушки ALD

Компания ALD предлагает три типа электронно-лучевых пушек в диапазоне мощности луча 60 кВт, 300 кВт и 800 кВт и 25–50 кВ с самой совершенной системой контроля развертки луча.

3.7. Электрошлаковые печи

Электрошлаковые печи (ЭШП) (рисунок 3.9) позволяют получать высококачественные стали. Принцип действия этих печей заключается в следующем. Расходуемый электрод погружают в слой жидкого электропроводящего шлака, который наводится в водоохлаждаемом медном кристаллизаторе. К расходуемому электроду и поддону кристаллизатора подводится переменный электрический ток, который проходит через слой шлака, нагревает его до тем-

пературы 1600–2000 °С и поддерживает в заданном режиме в процессе всего переплава. При этом часть тепла передается электроду, торец его расплавляется.

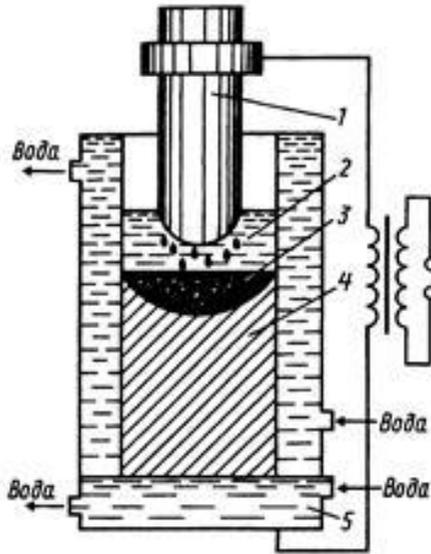


Рисунок 3.3 – Схема печи сопротивления (типа ЭШП) [51]:
1 – расходный электрод; 2 – жидкий шлак; 3 – жидкий металл; 4 – слиток или отливка; 5 – водоохлаждаемый поддон и кристаллизатор

Капли металла проходят через слой шлака и очищаются от вредных примесей в результате физико-химического взаимодействия со шлаком и попадают в жидкую ванну формируемого слитка или отливки. Рафинирование металла активным шлаком протекает и на оплавленном конце электрода, и на поверхности контакта шлаковой ванны с зеркалом лунки слитка. После переплава основной массы слитка проводят выведение усадочной раковины пу-

тем уменьшения мощности, подводимой к шлаковой ванне. Плавление электрода почти прекращается, но сохраняется большое количество жидкого шлака, что и обеспечивает получение плотной головной части слитка.

Кроме рафинирования металла, при электрошлаковом переплаве (ЭШП) обеспечивается направленное затвердевание слитка (снизу вверх) в водоохлаждаемом кристаллизаторе.

Таким образом достигаются высокая плотность и однородность металла, отсутствие пористости и других дефектов, присущих обычным слиткам. Металл, полученный в ЭШП, по механическим характеристикам не уступает горячекатаному металлу.

В процессе плавки на поверхности переплавляемого слитка формируется шлаковая корочка (гарнисаж), которая изолирует слиток от кристаллизатора. Таким образом, получается ровная гладкая поверхность слитка, не требующая дополнительной механической обработки.

Главным компонентом ЭШП является шлак, к которому предъявляют следующие требования:

- состав шлака должен обеспечивать рафинирование металла от нежелательных растворенных примесей, неметаллических включений, защиту активных легирующих элементов от окисления;

- при рабочих температурах (1500–1900 °С) электропроводность шлака должна быть стабильной 0,001–0,005 Ом/м. Превышение этих значений не обеспечивает необходимую концентрацию тепла;

– шлак должен быть достаточно легкоплавким, иметь высокую температуру кипения и не изменять вязкость в широком интервале температур, что обеспечивает образование тонкой равномерной корочки на поверхности слитка (отливки), т.е. формирование шлакового гарнисажа;

– шлак должен обеспечивать высокое межфазное натяжение на границе с металлом и обладать высокой адгезией к неметаллическим включениям;

– шлак не должен содержать дефицитные материалы, легко дробиться, он должен быть малогигроскопичным и недорогим;

– шлак должен быть экологически чистым.

Наиболее распространенными шлаками для ЭШП являются шлаки на основе фтористого кальция (CaF_2), который обеспечивает достаточную температуру плавления и кипения, хорошее удаление неметаллических включений и защиту металла от окисления.

Кроме этого, в шлак добавляют следующие материалы: CaO , Al_2O_3 , MgO и др., каждый из них выполняет ту или иную технологическую функцию, наиболее способствующую гарантированному улучшению качества металла.

В промышленности в основном используют готовые флюсы (таблица 3.1).

Расход флюса на плавку обычно не превышает 3–5 % от массы слитка. Высокие основность и температура шлаковой ванны обеспечивают высокую степень удаления S (в стали остается до 0,003–0,006 % S), газов и неметаллических включений. При отсутствии в составе стали нитридооб-

разующих элементов (*Ti*, *Zr* и др.) содержание O_2 снижается в 2 раза, водорода – в 1,5–2 раза, азота – в 1, 5–2,5 раза, а общее содержание неметаллических включений в 2–3 раза.

Таблица 3.1
Состав и свойства флюсов для установок ЭШП [57]

Марка флюса	Содержание компонента, %				$t_{пл}, ^\circ C$	$P, \tau/м^3$	Удельное сопротивление, Ом·м
	CaF_2	Al_2O_3	CaO	MgO			
АНФ-6	70	30	–	–	1320–1340	2,47	0,0030–0,0035
АНФ-291	18	40	25	17	1450	2,64	0,0037–0,0040

Печи для ЭШП выпускаются как с одним электродом, так и многоэлектродные. Количество электродов определяется либо сечением выплаваемого слитка, либо электрической схемой печи.

По способу выплавки слитка печи бывают с неподвижным глухим и со сквозным кристаллизаторами. В первом способе высота кристаллизатора равна высоте переплавляемого слитка, а во втором кристаллизатор перемещается относительно слитка по ходу плавки. В последнее время разработаны конструкции многоэлектродных печей с подвижным кристаллизатором.

Наиболее важным узлом печей ЭШП является кристаллизатор. Его изготавливают из меди или хромистой

бронзы, а наружный кожух – из немагнитной стали. Кристаллизаторы охлаждаются водой.

Печь электрошлакового переплава ЭШП-0.5Т-630кВА

ЭШП-0.5Т-630кВА [57] – печь электрошлакового переплава стали и получения слитков массой до 500 кг.

Особенности конструкции печи ЭШП-0.5Т-630кВА:

- одноэлектродная однопостовая конструкция печи;
- однофазный источник питания;
- устройство центровки кристаллизатора (регулировка по осям X-Y);
- шестеренный привод направляющих и вращения нового поколения;
- автоматизированная система контроля плавки.

Основной блок ЭШП: конструкция данного агрегата представляет собой однопостовую одномодульную печь (с одной головкой). Ход плавки автоматически контролируется компьютером.

Трансформатор 630кВА: напряжение на входе первичной стороны 10 кВ, напряжение на вторичной стороны 35 В-75В, бесступенчатая регулировка под нагрузкой. Максимальный ток плавки – 8,4 кА. Удельный расход электроэнергии – 1200–1500 кВт·ч/т.

Система контроля электрики: контрольная аппаратура поставляется *Mitsubishi* (Япония) серии FX2n. Программы и интерфейс «HMI» разработаны заводом-поставщиком.

Система оборотного водоохлаждения: водораспределительный узел с разводкой на короткую сеть, головку печи, кристаллизатор, поддон.

Двухпостовая одномодульная печь электрошлакового переплава ЭШПил-2Т-1600кВА

Двухпостовая одномодульная печь электрошлакового переплава ЭШПил-2Т-1600 [57] – современная двухпостовая электропечь нового поколения, предназначенная:

- для переплава стального расходуемого электрода в водоохлаждаемый кристаллизатор или тигель с последующей разливкой в машину центробежного литья;
- для получения стальных слитков и отливок массой до 2 т.

Расшифровка условного обозначения электропечи ЭШПил-2Т-1600кВА-НЗ:

- ЭШПил – вид нагрева и конструктивная особенность – печь электрошлаковый переплав и литья;
- 2Т – максимальная масса слитка/отливки, т;
- 1600 – мощность печного трансформатора, кВА;
- НЗ – исполнение печи – 3-е поколение.

Основные особенности электропечи ЭШПил-2Т-1600-НЗ[57]:

ЭШПил-2Т-1600-НЗ – двухпостовая одномодульная печь, в зависимости от выбранного поста, колонна печи вместе с электродержателем поворачивается в рабочее пространство 1-го (переплав в водоохлаждаемый кристаллизатор) или 2-го плавильного поста (переплав в тигель и разливкой на машине центробежного литья).

Печь ЭШПил совмещает в себе все достоинства электрошлакового переплава – получение металла высокой степени чистоты и литья – отливки сложной формы.

Несущей конструкцией электрошлаковой установки является вертикальная поворотная колонна с направляющими. На электрододержатель подвешивается переплавляемый электрод. Электрододержатель перемещается по направляющим стойки под действием приводной шариковой винтовой пары с серводвигателем, расположенным наверху стойки. Тигель печи устанавливается в кантователь и используется при сливе расплава в машину центробежного литья. Управление электропечью осуществляется в автоматизированном режиме с пульта, расположенного в пультовом помещении, в непосредственной близости от печи.

Примеры марок стали: жаропрочные, инструментальные, быстрорежущие, нержавеющие, хромоникелевые стали и т. п.

Примеры применения: детали, требующие высокую прочность и износостойкость, турбины тепловых двигателей, стали и железо-углеродистые сплавы использующиеся при температурах от $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$

Преимущества и конструктивные особенности печи ЭШПил-2Т-1600кВА:

- одномодульная двухпостовая конструкция электропечи;
- возможность производить переплав электродов как в кристаллизатор, так и в тигель с последующей разливкой на машине центробежного литья;
- электропечь комплектуется источником питания – специальным печным трансформатором 10кВ / 1600кВА с

регулировкой напряжения под нагрузкой, обеспечивающий значение тока до 19кА;

- максимальный вес слитков/отливок 2 тонны;
- механизм перемещения электрода нового поколения;
- винтовая пара «винт-гайка» с сервоприводом;
- процесс переплава осуществляется в соответствии с заданной программой плавки;

– система охлаждения электропечи имеет два контура охлаждения – охлаждение источника питания и узлов электропечи;

– система охлаждения представляет собой высокоэффективный теплообменный агрегат с замкнутым контуром охлаждения.

Система управления электропечью ЭШПиЛ-2Т-1600кВА реализует следующие функции:

- управление высоковольтным выключателем;
- измерение электрических параметров электропечи с высокой и низкой сторон напряжения;
- управление электрическим режимом электропечи в соответствии с заданной программой;
- контроль состояния водоохлаждаемых элементов электропечи и состояния оборудования;
- отображение информации о выполнении технологического процесса на экране панели оператора;
- корректировку и ручное вмешательство в ход процесса со стороны оператора;
- обработка предупредительных и аварийных сообщений и их визуализация;

– отображение текущего состояния систем электропечи;

санкционирование и проверка правомочности доступа к управлению печью.

Электрошлаковое литье (ЭШЛ) – это разновидность ЭШП. Существует два способа ЭШЛ:

– в первом переплавляется расходующийся электрод, а металл попадает в водоохлаждаемую форму;

– во втором – металл плавят электрошлаковым методом в тигле, а затем сливают в литейную форму.

Этот способ не уступает по экономическим показателям плавке в индукционных тигельных печах. Методом ЭШП в кокиль получают отливки (заготовки) для машиностроительных деталей ответственного назначения.

Контрольные вопросы

1. Какие недостатки мартеновского способа выплавки стали явились основной причиной их замены электродуговыми печами?

2. Какие наиболее значительные изменения произошли во второй половине XX века в конструкции электродуговых печей?

3. Назовите особенности технологии электродуговой плавки жидкой стали.

4. Назовите особенности технологии плазменно-дуговой плавки.

5. Какие стали выплавляют в плазменно-дуговых печах?

6. Какую атмосферу создают в плазменно-дуговых печах и что это позволяет достигать?

7. Назовите способствующие удалению из стали азота и водорода технологические факторы.

8. Что позволяют получать электрошлаковые печи (ЭШП)?

9. В чём заключается принцип действия электрошлаковых печей (ЭШП)?

10. Где протекает рафинирование металла активным шлаком в электрошлаковых печах (ЭШП)?

11. Какие требования предъявляются к главному компоненту ЭШП?

12. Назовите наиболее распространенные шлаки для ЭШП?

13. Назовите разновидности ЭШП – электрошлакового литья (ЭШЛ).

14. С какими конструкциями кристаллизаторов выпускаются ЭШП?

15. Назовите особенности вакуумно-дуговых и вакуумно-индукционных печей.

Часть 4. РАСКИСЛЕНИЕ И ВАКУУМНАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

4.1. Раскисление стали

После окончания окислительного рафинирования в жидком металле всегда содержатся газы: кислород, азот и водород, которые являются нежелательными примесями, вследствие чего возникает необходимость удалять их или переводить в такое состояние, при котором они оказывали бы наименьшее вредное влияние на свойства стали в отливке.

Снижение содержания кислорода в стали в результате связывания его в достаточно прочные соединения называют раскислением. Некоторые раскислители одновременно со снижением содержания кислорода способствуют удалению из металла серы и азота.

Содержание кислорода в металле зависит от содержания в нём углерода. Чем меньше содержание углерода в стали, тем больше в ней кислорода. Причем эта концентрация кислорода значительно выше равновесной с углеродом. Поэтому в процессе затвердевания металла в форме будут продолжаться реакция окисления углерода и выделение газов CO и CO_2 что, конечно, недопустимо.

При вводе раскислителя в металл, содержащий кислород, образуется продукт раскисления, который может быть газообразным, жидким или твердым.

Одной из задач раскисления является снижение содержания кислорода до такой величины, когда процесс

кристаллизации отливки будет протекать без выделения газов. При этом содержание O_2 должно быть значительно ниже равновесного с углеродом, и чем оно ниже, тем лучше. Остаточное содержание марганца в готовом металле должно быть не менее 0,3–0,5 %, а кремния – 0,2–0,3 %.

Другая задача раскисления состоит в обеспечении возможно меньшего содержания в стали продуктов реакций раскисления – неметаллических включений (НВ) или получении таких НВ, которые оказывают на металл минимально вредное влияние. Такими свойствами обладают НВ размерами 10 мкм. Желательно, чтобы они имели глобулярную форму и распределялись в металле равномерно.

Задача трудная и решается с помощью модифицирования НВ.

Еще одна задача раскисления сводится к получению мелкозернистого строения металла и решается путем получения мельчайших НВ, выделяющихся из жидкой фазы в твердом виде и играющих роль центров кристаллизации в отливке.

На практике элемент-раскислитель вводится в металл не только для снижения содержания кислорода, но и для улучшения механических и других свойств стали. А количество раскислителя устанавливается при разработке данной марки стали. Поэтому общие требования к раскислителям следующие:

- высокое сродство к кислороду;
- низкая стоимость и недефицитность;

– склонность к образованию оксидов, не растворимых в жидкой стали, легко удаляющихся из нее или приносящих минимальный вред ее свойствам.

Раскислительная способность некоторых элементов показана на рисунке 4.1.

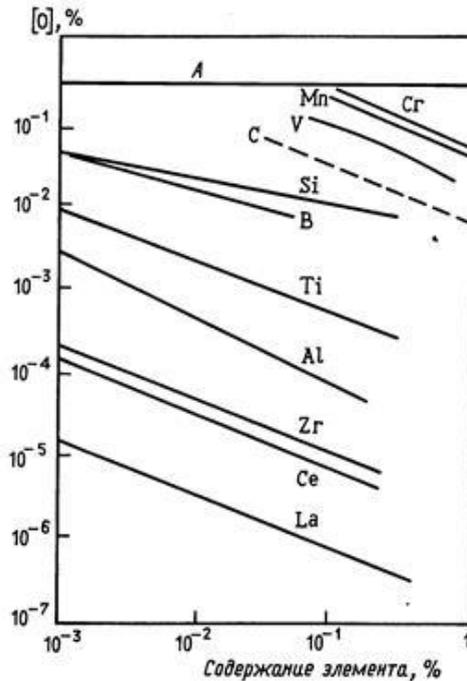


Рисунок 4.1 – Раскислительная способность элементов [51]:

A – растворимость кислорода в жидком железе

На практике существует большое количество раскислителей, каждый из которых выбирается в зависимости от марки выплавляемой стали. Наиболее распространенным и относительно дешевым раскислителем является марганец. Его вводят в металл чаще всего в виде ферромарганца (75–

80 % марганца). Он имеет высокое сродство к кислороду и сере.

Хорошим раскислителем является кремний, который в сталь вводят в виде ферросилиция. Он выпускается как с низким (10–20 %), так и с высоким (65–75 %) содержанием кремния. В чистом виде кремний применяют редко. Кремний имеет большее сродство к кислороду, чем марганец.

Конечное раскисление стали практически всегда осуществляется алюминием. Алюминий применяют в технически чистом виде. Он является одним из лучших раскислителей стали. Обладает высоким сродством к кислороду и измельчает зерно аустенита.

Остаточное содержание алюминия в сталях обычно составляет сотые доли процента при расходе 0,5–2,0 кг/т. При этом обеспечиваются остаточное содержание кислорода в стали 0,001–0,005 % и плотная структура отливок без газовых дефектов.

Высокое остаточное содержание алюминия ухудшает свойства отливок не только из-за процессов вторичного окисления, но и вследствие образования пленочных нитридов алюминия по границам зерен. На это обстоятельство необходимо обращать серьезное внимание при выплавке аустенитных и азотсодержащих сталей в дуговых печах, где в зоне дуги идет интенсивная диссоциация молекулярного азота и его поступление в металл.

При раскислении сталей алюминием его концентрация не должна достигать равновесной с азотом. В этом случае в жидком металле нитриды алюминия не образуются.

Их выделение может происходить в затвердевающей отливке при температурах 900–1100°С. При этом, чем ниже температура нитридообразования, тем больше пленочных нитридов алюминия выделяется по границам зерен. Это резко снижает свойства литого металла. Нейтрализовать такое специфическое влияние алюминия можно добавками более сильных нитридообразующих элементов, в частности, титана, циркония. Проведенные исследования на азотсодержащей литейной стали 15Х2Н4ДМАФЛ показали невозможность её раскисления одним алюминием из-за образования пленочных нитридов. В дополнение был предложен титан, который не только позволял хорошо раскислять сталь, но и модифицировать её и тем самым улучшать свойства. Однако добавки таких нитридообразующих элементов должны находиться в определенных пределах, когда достигается максимальный эффект. Как правило, это определяется экспериментально для каждой марки стали.

Титан и цирконий – очень хорошие раскислители, но очень дороги. Их используют при выплавке сталей специального назначения. Применяют титан и цирконий при раскислении в виде ферротитана (18–20 % *Ti*) и ферроциркония (10–15 % *Zr*).

Наилучшие результаты достигаются при комплексном раскислении стали алюминием и элементами с высоким сродством к сере, азоту, кислороду. При комплексном раскислении элементы вводят в сталь как отдельно, так и в виде сплавов с таким расчетом, чтобы обеспечить оптимальное содержание алюминия и других элементов, обес-

печивающих наилучшие тип, форму, размер неметаллических включений.

Широкое применение для раскисления стали нашли лигатуры с редко- и щелочноземельными металлами – церием, лантаном, иттрием, кальцием, барием, магнием. Редкоземельные металлы (РЗМ) обладают очень хорошими раскислительными свойствами, так как имеют высокое сродство к кислороду, сере, азоту. Низкая температура плавления (1000 °С) позволяет вводить их в ковш и даже в форму. Благоприятное влияние РЗМ и ЩЗМ на качество литейных сталей связано с высокой раскислительной способностью, рафинирующим эффектом, глобуляризацией включений. Однако использование этих элементов более эффективно после предварительного раскисления алюминием.

Разностороннее, положительное влияние на свойства стали оказывает ванадий. Он обеспечивает образование мелкозернистой структуры и повышение прочности, износостойкости и других свойств. Вводят его в металл в виде феррованадия (35–45 % V), который не только дорог, но и дефицитен. Однако разработанные на Урале технологии плавки ванадий содержащих сталей с использованием вместо феррованадия ванадийсодержащих шлаков позволяют значительно снизить расходы.

Наиболее сильные раскислители – это кальций, барий, магний. Они имеют высокое сродство к кислороду и сере. Продуктами раскисления являются мелкие глобулярные окисульфидные НВ, равномерно распределенные по объему металла. Достоинство этих раскислителей состоит

еще и в том, что их количество, необходимое для раскисления, не превышает сотых долей процента.

В последние годы широкое распространение получили комплексные раскислители, содержащие несколько элементов, например, силикокальций, ферросиликоалюминий и др.

Наиболее дешевыми являются комплексные сплавы на основе церия и кремния. Идеальным раскислителем является углерод, так как продукты его раскисления удаляются в газовую фазу. Но его свойство раскислителя проявляется лишь при вакуумировании или продувке металла инертными газами.

При обычном давлении углерод может быть раскислителем для шлака при диффузионном раскислении металла.

Всего существует три вида раскисления по способу удаления кислорода из металла:

- 1) осаждающее;
- 2) экстракционное (диффузионное);
- 3) вакуумно-углеродное.

Осаждающее раскисление заключается в том, что растворенный в металле кислород частично переводят в оксиды элементов раскислителей, которые добавляют в сталь. Образовавшиеся оксиды всплывают на поверхность металла и ассимилируются со шлаком.

Экстракционное (диффузионное) раскисление осуществляют путем наведения на поверхности металла шлака, у которого окисленность во много раз меньше, чем у шла-

ков окислительного рафинирования. Происходит перераспределение кислорода в металле и шлаке, так как в новом шлаке содержится минимальное количество оксидов железа (0,1–0,5 % FeO). При этом продукты раскисления не остаются в металле, но требуется большой расход материалов и времени. Кроме того, весь фосфор, находящийся в шлаке, может перейти в металл.

Экстракционное (диффузионное) раскисление применяется при обработке стали синтетическими шлаками.

Вакуумно-углеродное раскисление связано со смещением равновесия реакции окисления углерода $[C] + [O] = \{CO\}$ вправо, снижением парциального давления CO в газовой фазе в вакууме или при продувке инертным газом. Степень раскисления металла углеродом на практике существенно ниже, чем теоретическая, т.к. металл во время вакуумирования соприкасается с футеровкой агрегата и при этом происходит восстановление оксидов футеровки, например, оксидов кремния, что повышает концентрацию не только кислорода в металле, но и некоторых примесей до недопустимо высоких пределов. При вакуумировании необходимо иметь футеровку из стойких оксидов типа магнетита или доломита.

Раскисление металла в плавильном агрегате сопровождается значительным угаром раскислителя. Его проводят, когда необходимо ввести большое количество труднорастворимых раскислителей и невозможно предварительно их расплавить. Раскисление в агрегате преимущественно

осаждающее, но в дуговых печах возможно и экстракционное раскисление.

Самым распространенным считается осаждающее раскисление в сталеразливочном ковше, так как оно самое дешевое. Недопустимо лишь введение в ковш большого количества труднорастворимых раскислителей.

4.2. Внепечная обработка стали

Внепечная обработка способствует улучшению технико-экономических показателей производства, а также существенно улучшает качество стали в отливках. К традиционным методам обработки относятся:

- вакуумирование;
- продувка инертными газами (преимущественно аргоном);
- обработка синтетическими шлаками.

Все эти способы рафинирования позволяют решать следующие задачи:

1. Обезуглероживание металла до весьма низких концентраций (менее 0,010—0,005 %) достигается обработкой его в вакууме без продувки кислородом и с продувкой кислородом, инертным газом в смеси с кислородом (водяным паром с кислородом) при атмосферном давлении.

2. Глубокое рафинирование металла от серы (менее 0,003 %) обработкой синтетическими шлаками на основе извести при предварительном наведении покровного шлака, вдуванием в металл десульфурствующих добавок

(карбида кальция, силикокальция или сплава магний–кальций).

3. Раскисление с получением стали, мало загрязненной неметаллическими включениями регулируемой формы и размеров, вакуумированием или обработкой порошками металлов или других материалов.

4. Удаление из металла водорода H путем вакуумирования с использованием технологий, способствующих усилению процессов массообмена, чтобы сталь была нефлокеночувствительной.

5. Получение металла необходимого состава с регулируемым содержанием необходимых элементов в узких пределах и уменьшением их угара — вакуумированием, введением раскислителей и легирующих при низком окислительном потенциале контактирующих с металлом газовой и шлаковой фаз.

6. Выравнивание состава и температуры металла в объеме ковша (перемешивание), регулирование температуры продувкой инертными газами, дополнительным нагревом металла в ковшес помощью электрической дуги.

Вакуумирование стали осуществляется несколькими способами:

- в струе (SH);
- в ковше (LH);
- порционное (DH);
- циркуляционное (KH).

Различают также разновидности этих процессов (рисунки 4.1).

Струйное вакуумирование металла (рисунок 4.2) осуществляется путем перелива его, например, из печи в ковш через приемную воронку, которая имеет отверстие в нижней части (шибер или стопор), а в ковше создается разряжение, и до начала перелива впускное отверстие перекрывается алюминиевым листом толщиной ≈ 2 мм.

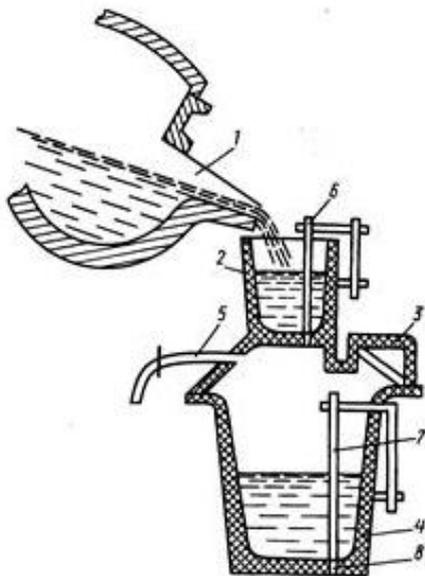


Рисунок 4.1 – Схема вакуумирования стали под крышкой в сталеразливочном ковше [51]:

1 – желоб печи; 2 – приёмная воронка со стопором на крышке сталеразливочного ковша; 3 – съёмная герметизированная крышка с воронкой; 4 – разливочный стопорный ковш; 5 – трубопровод к вакуумному насосу; 6 – стопор выпускного отверстия из воронки в ковше; 7 – стопор разливочного ковша; 8 – выпускное отверстие

Жидкая сталь при переливе прожигает алюминиевый лист и сразу попадает в вакуум. Струя металла распа-

дается на капли, размер которых зависит от остаточного содержания в них газов и от разрежения в камере. Диаметр капель может достигать $10-10^{-3}$ мм. Они падают веером с углом раскрытия от 20 до 40 °. При вакуумировании нераскисленной стали этот угол раскрытия может достигать 140 °. Большая поверхность капель обеспечивает удаление из металла водорода (30–70 %), азота (< 30 %), а также процесс окисления углерода до 0,002–0,007 %. Вакуумное раскисление металла углеродом снижает содержание и размер неметаллических включений на 50–70 %.

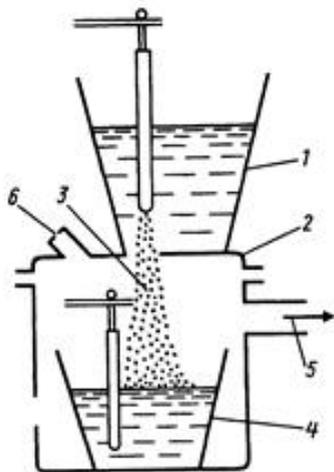


Рисунок 4.2 – Вакуумирования струи стали [51]:

1 – ковш со сталью; 2 – вакуумная камера; 3 – вакуумная струя стали; 4 – ковш с вакуумированной сталью; 5 – к вакуумному насосу; 6 – смотровое окно

По мере наполнения ковша происходит дополнительная дегазация расплава с поверхности, особенно сильно, если идет реакция окисления углерода. Одновременно

с вакуумированием стали можно вести ее раскисление и легирование в струе, подавая необходимые материалы из специального герметичного бункера.

Недостатками данного вакуум-способа являются: существенные потери температуры металла при переливе (30–110 °С), необходимость использования вакуумного насоса большой мощности, низкая стойкость футеровки.

*Струйное вакуумирование
при отливке крупных слитков*

Широко применяется струйное вакуумирование при отливке крупных слитков при отливке крупных слитков массой до 100 т и более, обрабатываемых, как правило, ковкой. Разработка и промышленное освоение этого способа вакуумной обработки стали является принципиально новым шагом в повышении качества весьма ответственных крупных изделий. Принципиальная схема установки показана на рисунке 4.3.

Изложница 1 для приёма металла помещается в вакуумную камеру 2. Металл из сталеразливочного ковша 4 попадает в промежуточную ёмкость 3, представляющую собой большую воронку. Через воронку металл попадает в вакуумную камеру, где разбивается на мелкие капли благодаря естественному газовыделению. Капли металла, имеющие огромную удельную поверхность, взаимодействуют с газовой фазой (подвергаются воздействию вакуума) во время их падения. Кроме того, металл, находящийся в изложнице, тоже подвергается воздействию вакуума примерно также, как при порционном вакуумировании [54].

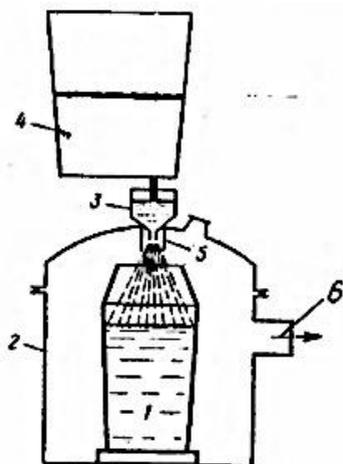


Рисунок 4.3 – Схема установки для отливки крупных слитков в вакууме [54]:

1 – изложница; 2 – вакуумная камера; 3 – промежуточная ёмкость; 4 – ковш с металлом; 5 – ограничитель разбрызгивания струи; 6 – к вакуумному насосу

Сталь для отливки крупных слитков обычно содержит углерода не менее 0,2 %, нередко до 0,5 % и даже выше. Поэтому при ее обработке вакуумом описываемым способом происходит не только глубокая дегазация, обеспечивающая полное устранение образования флокенов (опасного дефекта крупных слитков легированной стали), но и глубокое вакуумно-углеродное раскисление, результатом которого является весьма существенное снижение содержания оксидных неметаллических включений в слитке. В итоге наблюдается скачок в повышении качества стали и изделий из неё. Это связано, во-первых, с тем, что улучшаются кинетические условия взаимодействия металла с газовой фазой, благодаря чему эффек-

тивность вакуумирования существенно повышается; во-вторых, весь эффект вакуумирования сохраняется (фиксируется в готовом металле).

При порционном и циркуляционном вакуумировании часть эффекта этой операции теряется во время разливки стали. К сожалению, лишь малая доля ($\leq 5\%$, редко выше) производимой стали идет на отливку крупных слитков. Основная масса производимой стали разливается непрерывным способом с использованием явно малоэффективных способов порционного и циркуляционного вакуумирования. Учитывая это, в конвертерном цехе № 2 НЛМК была сделана попытка совместить струйное вакуумирование с непрерывной разливкой [53].

*Струйное вакуумирование,
совмещенное с непрерывной разливкой*

Струйное вакуумирование, совмещенное с непрерывной разливкой, названное авторами поточным вакуумированием, по идее является способом, заслуживающим самого серьезного внимания. Принципиальная схема установки показана на рисунке 4.4, которая вполне понятна без дополнительного пояснения [53].

Проведенные производственные эксперименты показали, что при таком способе вакуумирования обеспечивается почти полная реализация термодинамических возможностей обезуглероживания металла. Кроме того, этот способ позволяет весьма существенно сократить время нахождения металла в ковше по сравнению с обычными способами вакуумирования, благодаря чему

становится возможным выпускать металл из сталеразливочного агрегата с меньшим перегревом выше температуры плавления; почти полностью исключить вторичное насыщение металла газами во время разливки, неизбежное при вакуумной обработке обычными способами.

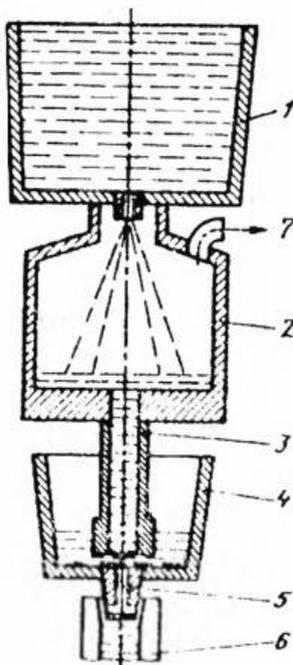


Рисунок 4.4 – Схема установки поточного вакуумирования [53]:

- 1 – сталеразливочный ковш; 2 – вакуумная камера;
- 3 – металлопровод; 4 – промежуточный ковш;
- 5 – сталеразливочный ковш; 6 – кристаллизатор УНРС;
- 7 – к вакуумному насосу

Основным недостатком рассматриваемого способа вакуумирования является необходимость увеличения расстояния между сталеразливочным и промежуточным

ковшами, а это в действующих цехах практически невозможно. Этот перспективный способ вакуумирования стали может быть полноценно реализован при изменении принципа подвода вакуумированного металла в промежуточный ковш.

Вакуумирование в ковше (рисунок 4.5) осуществляется следующим образом: сталеразливочный ковш 4 с расплавленным металлом помещают в специальную камеру 1, которую герметично закрывают и в ней создают вакуум.

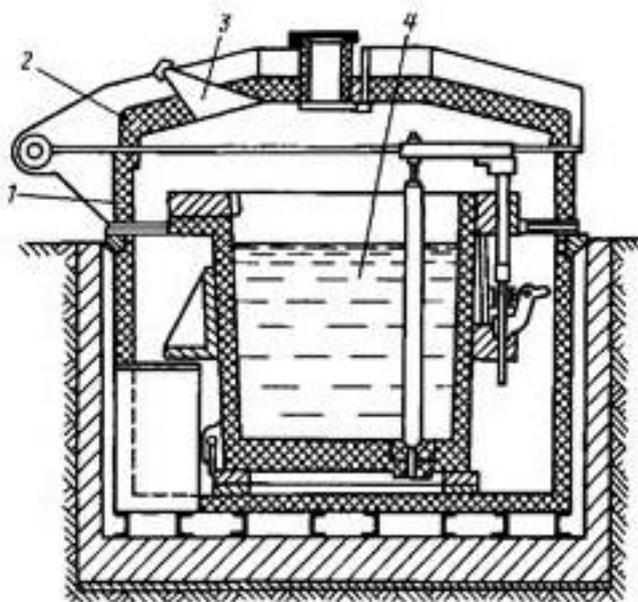


Рисунок 4.5 – Схема установки для вакуумирования жидкой стали в ковше [51]:

1 – вакуумная камера; 2 – крышка; 3 – смотровое окно;
4 – ковш с металлом

Сталь выдерживают в ковше под низким давлением некоторое время с одновременным принудительным перемешиванием и нагревом. Попадание шлака с металлом нежелательно. При откачке воздуха из камеры металл начинает кипеть (нераскисленные стали кипят интенсивнее раскисленных) уже при давлении 60–80 кПа; чем ниже остаточное давление, тем выше интенсивность кипения. По мере ее снижения в ковш можно вводить необходимые легирующие элементы. Этот способ вакуумирования имеет следующие достоинства: простота оборудования, относительно малые теплотери, он хорошо вписывается в технологическую цепочку цеха. При вакуумировании в ковше водород удаляется до содержания $1,5\text{--}2,5 \cdot 10^{-4} \%$, что составляет 50–75 %. Существенно сказывается на величине остаточного содержания водорода степень раскисленности стали. Нераскисленная сталь дает лучшие результаты.

Азот не очень хорошо удаляется из металла, степень удаления азота не превышает 20 %. Кислород удаляется из металла до 50 %. Кроме того, в стали после вакуумирования остается значительно меньше оксидных неметаллических включений. Чтобы улучшить процессы вакуумирования, металл в ковше перемешивают, например, продувкой аргоном через пористую пробку, установленную в днище ковша. Этот способ вакуумирования, главным образом, применяют при производстве высокохромистых сталей. При этом достигают содержания углерода 0,015–0,020 % и усвоения хрома до 98,0 %. Наиболее эффективным способом вакуумирования в ковше является процесс УАП, в котором ис-

пользуют электродуговой подогрев металла во время вакуумирования и продувку аргоном через пористые пробки в днище ковша.

Главным недостатком вакуумирования в ковше является невысокая его эффективность, что и вызвало появление многих разновидностей этого способа.

Порционное вакуумирование появилось в 50-е годы XX века (рисунок 4.6) и сразу нашло широкое применение.

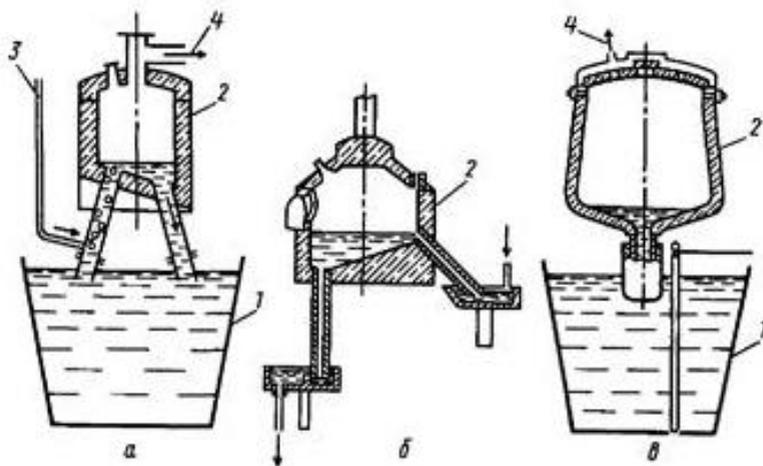


Рисунок 4.6 – Схемы порционного вакуумирования стали [51]:
а – циркуляционное; б – непрерывное; в – отдельными порциями; 1 – ковш с металлом 2 – вакуумная камера; 3 – подача транспортирующего газа; 4 – к вакуумированным насосам

Порционное вакуумирование заключается в том, что часть металла из разливочного ковша засасывается порциями через огнеупорный патрубок, нижний конец которого постоянно находится в металле, в вакуумную камеру, находящуюся над ним, выдерживается там некоторое время,

дегазируется и возвращается обратно в разливочный ковш. Вакуумная камера имеет специальный патрубок, который и опускается в металл. Двигаться вверх-вниз может как ковш, так и вакуумная камера в зависимости от конструкции всей установки. Из-за разницы давлений между внутренней полостью камеры и атмосферой над расплавом жидкий металл затекает в вакуумную камеру на высоту не более 1,4 м. В разреженном пространстве идут реакции дегазации металла. В этой камере предусмотрены не сколько герметичных бункеров для ферросплавов. Вместимость по жидкому металлу не должна быть менее 10 % от общей массы обрабатываемого металла.

Перед вакуумированием металла камеру подогревают до температуры 1300–1500 °С, время дегазации колеблется от 20 до 30 с. Для получения удовлетворительных результатов вакуумирования необходимо, чтобы весь металл ковша прошел через вакуумную камеру 3–4 раза.

Эффективность вакуумирования стали любым способом в большой степени зависит от разрежения в камере, от остаточного давления газов в ней, которое зависит от типа и производительности вакуумных насосов, а также от времени вакуумирования. В начале процесса, когда газовыделение из металла энергичное, остаточное давление относительно высокое, а в конце процесса оно минимально и обычно составляет 0,5 мм рт.ст. Наилучшие вакуумные насосы обеспечивают конечное давление 0,1–0,2 мм рт. ст.

Способом порционного вакуумирования можно достигнуть удаления 60–80 % водорода, 25–30 % азота, а при

вакуумировании нераскисленной стали можно удалить до 90 % кислорода со снижением до 50 % содержания оксидных НВ. При легировании значительно снижается угар элементов. Недостатками данного способа вакуумирования являются: низкая стойкость огнеупоров вакуумной камеры, существенные потери температуры металла.

Циркуляционное вакуумирование появилось позже порционного, но сразу же нашло широкое применение в промышленности. Установка состоит из вакуумной камеры с двумя рукавами – подъемным и сливным (рисунок 4.4, а). Камера соединена с вакуумным насосом. При опускании патрубков в металл и создании разрежения сталь поднимается в камеру на барометрический уровень. В камере создается слой металла высотой 200–400 мм. В один из рукавов в металл подается аргон, который образует в нем взвесь мелких пузырьков, поднимающихся по патрубку и увлекающих за собой металл. По мере подъема пузырьки растут, осуществляя первичную дегазацию металла. Попав в вакуумную камеру, металл дополнительно дегазируется и под действием ферростатического давления стекает во второй патрубок и в ковш. Таким образом, происходит непрерывная с установившейся определенной скоростью циркуляция металла через вакуумную камеру. Скорость циркуляции зависит от диаметра патрубков, остаточного давления в вакуумной камере, расхода аргона и места подвода его в патрубок и др. Скорость движения металла в подъемном патрубке может достигать 60 м/мин, а расход аргона – до 30 л/т. Подачу аргона начинают до поступления металла в

вакуумную камеру. Перед началом процесса камеру нагревают до 1450–1550 °С. Коэффициент циркуляции необходимо поддерживать в пределах 3–4. Потери температуры при вакуумировании могут быть и 100 °С. Наиболее распространенный способ компенсации теплопотерь – предварительный перегрев металла в плавильном агрегате. Предусмотрен ввод ферросплавов.

Во всех способах вакуумирования главным недостатком является существенное снижение температуры стали. Это послужило одной из причин создания нового способа ковшевого вакуумирования металла, предусматривающего дополнительный нагрев, перемешивание, обработку аргоном, возможность легирования и др. Такая установка получила название печь-ковш.

Оборудование этой установки состоит из следующих основных устройств:

- электродугового нагрева;
- электромагнитного перемешивания; вакуумной обработки;
- дозирования легирующих материалов и раскислителей; продувки аргоном;
- вакуумных насосов и др.

Процесс обработки металла протекает следующим образом: металл, выплавленный в плавильном агрегате, где из него удален фосфор и значительная часть серы, а содержание углерода соответствует заданной марке стали, поступает в ковш без окислительного шлака. В процессе выпуска и перелива в ковше наводят нейтральный или основной

шлак в количестве 10–12 % от массы металла. Ковш помещают в вакуумную камеру, которую закрывают, включают насосы откачки воздуха и дуговую установку. Перемешивание металла осуществляют либо электромагнитами, либо продувкой аргоном, который подают через пористые вставки в днище ковша. После прекращения кипения металла в него вводят раскислители или легирующие. Длительность такого процесса составляет 45–90 мин. Этот способ обработки металла дает хорошие результаты по улучшению качества стали, но требует дополнительных затрат.

Продувка стали инертными (нейтральными) газами в ковше обеспечивает: выравнивание и корректировку температуры металла, точное регулирование химического состава металла, ускорение расплавления и распределения легирующих элементов в объеме ковша, повышение чистоты металла по оксидным включениям.

В качестве продувочных газов можно использовать аргон, гелий, азот, оксид углерода. Самое большое распространение получил аргон плотностью $1,78 \text{ кг/м}^3$. Получают его при ректификации жидкого воздуха. Продувку гелием практикуют в основном в США. Азот используют для продувки сталей, не содержащих нитридообразующих элементов (хром, титан, ванадий и др.). Сущность обработки состоит в том, что металл в ковше продувают инертным газом через специальные устройства. Расход, например, аргона обычно составляет 0,2–0,5 м. Этот способ улучшения качества металла нашел широкое применение во всем мире, так как для его осуществления не требуется сложного оборудо-

вания, и процесс легко вписывается в технологию цеха; не требуется больших капиталовложений, невысоки и производственные расходы.

Дегазирующее действие нейтрального газа основывается на том, что вследствие разности парциальных давлений газов в металле и пузырьках нейтрального газа, пронизывающих расплав, пузырьки поглощают газ и выносят его в атмосферу.

Самым простым устройством для продувки металла газом являются различного рода пористые вставки, блоки, пробки (рисунок 4.7). Обычно их изготавливают из качественных огнеупорных материалов (корунд Al_2O_3 , благородная шпинель $MgO \cdot Al_2O_3$, корунд-муллит, сложные смеси на основе огнеупорной глины и шамота в смеси с цементом).

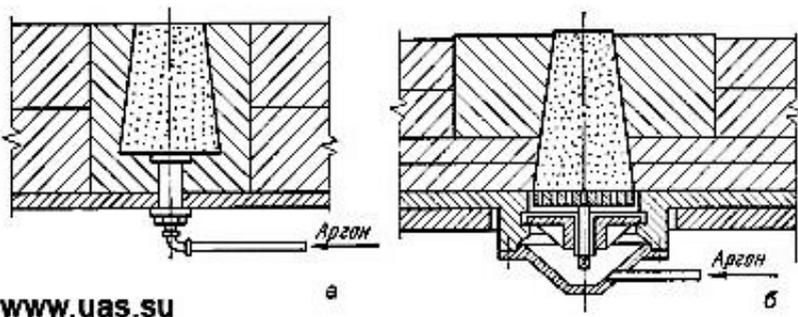


Рисунок 4.7 – Схемы установки пористой огнеупорной вставки в днище ковша при монтаже вставки [54]:

а – изнутри и *б* – снаружи

Наилучшие результаты были получены при продувке через пористые огнеупоры. Их (пористые вставки, блоки)

вставляют в днище ковша как стационарно, так и с возможностью замены. Недостаток этого способа состоит в возможности прохода газа между пористой пробкой и футеровкой ковша, что может послужить причиной серьезной аварии.

Надежными являются продувочные устройства автономного типа, которые монтируют в футеровке днища.

При продувке стали аргоном можно достичь степени удаления водорода 45–70 %, азота 25–65 %. Температура стали за время продувки снижается со скоростью до величины 3 °С/мин. Тепло теряется как на нагрев газа, так и на излучение с поверхности ковша. В результате продувки обеспечивается достаточно высокая однородность металла в отливках после кристаллизации. При совмещении продувки стали с обработкой ее синтетическими шлаками для удаления серы получено увеличение коэффициента распределения серы в 2–2,5 раза больше, чем при обработке стали только шлаками. При продувке металла удается сместить равновесие реакции окисления углерода в сторону образования CO . Это успешно используют при выплавке низкоуглеродистых высокохромистых сталей.

Рафинирование стали жидкими синтетическими шлаками

Рафинирование стали жидкими синтетическими шлаками впервые предложено в 1925 г. инженером А.С. Точинским. Рафинирующая обработка стали жидкими синтетическими шлаками проводится с целью раскисления стали, дополнительной очистки от вредных примесей и неметал-

лических включений. Для рафинирования жидкой стали синтетическим шлаком обычно применяют двухкомпонентный известково-глиноземистый шлак, содержащий 55 % CaO и 45 % Al_2O_3 . Шлак выплавляют в отдельной электродуговой печи с футеровкой из графита (рисунок 4.8, I). Такой шлак активен благодаря минимальному содержанию FeO и обладает хорошей десульфирующей способностью. Синтетическими шлаками обрабатывают сталь, полученную в конвертерах и крупных электропечах.

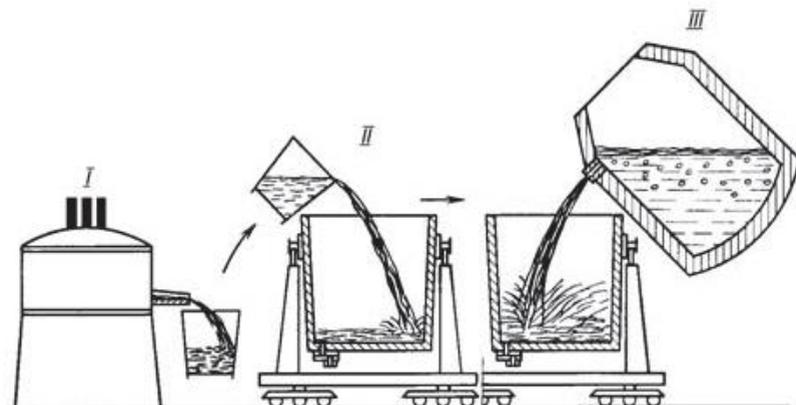


Рисунок 4.8 – Схема обработки стали жидкими синтетическими шлаками [55]:

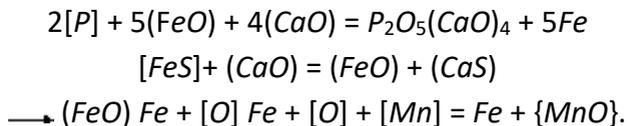
I – дуговая печь для выплавки синтетического шлака; II – заливка шлака в сталеразливочный ковш; III – выпуск стали

Для рафинирующей обработки стали порцию шлака в количестве 5–6 % от массы стали заливают на дно сталеразливочного ковша (рисунок 4.8, II). Ковш подают к желобу сталеплавильного агрегата и выпускают сталь. Струя жидкой стали падает с большой высоты на слой шлака в ковше и энергично с ним перемешивается (рисунок 4.8, II). Поверх-

ность взаимодействия металла и шлака резко увеличивает, что способствует интенсивному удалению в шлак серы, кислорода и других неметаллических примесей. В результате возрастают прочностные характеристики получаемой стали.

Технология этого процесса проста и заключается в следующем. Порцию шлака в количестве 3–6 % от массы металла помещают в сталеразливочный ковш, а затем в него выпускают сталь. Струя жидкой стали, непрерывно падая с высоты 2–4 м, хорошо перемешивает шлак и поверхность взаимодействия его с металлом резко возрастает, т.е. увеличивается скорость перехода вредных примесей (сера, фосфор) из металла в шлак.

Шлак, состоящий из CaO , CaF_2 , Al_2O_3 , выплавляют в специальной дуговой печи с угольной футеровкой. Шлак выпускают нагретым до 1650 °С. Ковш со шлаком подводят к сталеплавильной печи и устанавливают так, чтобы высота падения струи металла составляла 3–5 м. При падении струи металла в ковш происходит перемешивание жидкого металла со шлаком, увеличивается поверхность контакта «металл–шлак», происходит интенсивное удаление S , P , газов, растворенных в металле, неметаллических включений.



Так, в процессе обработки металла синтетическими шлаками содержание серы уменьшается до 0,005–0,006 %, суще-

ственно уменьшается количество P , N_2 , O_2 , H_2 и неметаллических включений.

Степень десульфурации может достигать 75 % с уменьшением количества неметаллических включений в готовой стали. Коэффициент распределения серы между металлом и шлаком колеблется от 25 до 80. Эффективность обработки стали шлаками зависит от:

- относительного количества шлака;
- состава шлака;
- режима взаимодействия с металлом (конструкция устройства, где будет проходить обработка);
- температуры плавления шлака;
- вязкости;
- межфазного натяжения на границе с металлом и др.

Температура плавления шлака не должна быть выше 1400–1500 °С, так как обрабатываемый металл имеет температуру более 1550 °С, и шлак хорошо сохраняет свою жидкоподвижность. После рафинирования синтетическими шлаками сталь становится более пластичной и обладает повышенной ударной вязкостью, кроме того, существенно снижается анизотропия механических свойств.

Контрольные вопросы

1. Каким бывает продукт при вводе раскислителя в металл, содержащий кислород?
2. Назовите общие требования к раскислителям.
3. Каким элементом-раскислителем практически всегда осуществляется при конечном раскислении?

4. При каком способе раскисления достигаются наиболее лучшие результаты?
5. Назовите наиболее сильные раскислители.
6. Какие лигатуры нашли широкое применение для раскисления стали?
7. Назовите самое распространенное осаждающее раскисление стали.
8. Назовите традиционные методы внепечной обработки стали.
9. Чему способствует внепечная обработка стали?
10. Назовите способы вакуумирования стали.
11. Что представляет собой порционное вакуумирование стали?
12. Какими газами ведётся продувка жидкой стали?
13. Для чего проводится продувка жидкой стали?
14. Что применяют для рафинирования жидкой стали синтетическим шлаком?
15. На чём основывается дегазирующее действие нейтрального газа?
16. Что обеспечивает продувка стали инертными (нейтральными) газами в сталеразливочном ковше?

Часть 5. ЦИФРОВИЗАЦИЯ МЕТАЛЛУРГИИ

5.1. Цифровизация производства [L] [SEP]

Современная мировая и российская металлургическая промышленность сталкиваются с серьезными проблемами из-за высоких производственных затрат и усиленного внешнего регулирования, вызванного вследствие [63]:

– высоких требований к продукции (переход от товарной стали к разнородному ассортименту продукции, применение более прочной стали, сокращение жизненных циклов продуктов в перерабатывающей сфере); [L]
[SEP]

– давления на стоимость (увеличение экспорта из КНР и стагнация китайской экономики, замедление среднегодового темпа роста рынка приводит к ослаблению спроса);

– сложности процесса и требований к обслуживанию (сокращение инновационных циклов требует гибкого использования пропускной способности, необходимость оптимизации ассортимента для гетерогенных изделий и небольшого размера партии специальной стали – сосредоточение на обслуживании и гибкости); [L]
[SEP]

– нормативных требований (амбициозные правила регулирования выбросов CO_2 повышают эффективность торговли сертификатами и вызывают дополнительные затраты, устойчивые проблемы в перерабатывающей сфере, эффективное использование ресурсов и энергии). [L]
[SEP]

Если в прошлом важнейшим фактором конкурентоспособности и создания ценности для производителя металлургической продукции было его состояние по кривой

затрат, то сегодня и в будущем по сравнению с самим физическим продуктом приобретают все большую ценность цифровые данные с получением высокой эффективности от их использования. Для повышения результативности, производительности, устойчивости, разумного управления процессами и оптимального использования рабочей силы металлургам необходимо в кратчайшие сроки перейти на концепцию «Промышленность 4.0» и максимально использовать ее возможности. Для технического прогресса индустрия должна быть сенсублизирована на всех уровнях. В этом контексте преимуществами для металлургической отрасли могут быть [64]:

- вертикальная интеграция на основе систем киберфизического производства (Cyber Physical Production System, CPPS); [SEP] 100 %-ная прослеживаемость промежуточных и конечных продуктов;

- интеллектуальный продукт, созданный со знанием собственного качества и истории производства (один из аспектов сквозной инженерии); [SEP]

- интенсивная сеть и связь всех предприятий (горизонтальная интеграция внутри компании); [SEP]

- интенсивная связь по всей цепи поставок (горизонтальная интеграция за пределами компании); [SEP]

- соответствующая обработка и использование всех децентрализованных данных, а не центральных решений, т.е. самоорганизации.

Перечисленный потенциал цифровизации всех этапов производства, определяющий концепцию «Промыш-

енность 4.0», соблюдение которого изменяет взаимодействие с поставщиками и клиентами посредством использования новых онлайн-платформ, приложений и других систем, а также предлагающих отслеживание заказов и другие сервисы, открывает, в свою очередь, возможности для совершенно новых бизнес-моделей и предусматривает разработку целой цифровой производственной экосистемы, в которой данные, накопленные как в нисходящем, так и в восходящем секторах, включаются в цепь создания стоимости [65–67].

Цифровизация включает четыре категории возможностей, которые обеспечиваются следующим набором технологий и подходов [68–69]:

- расширенная аналитика и искусственный интеллект;
- робототехника и автоматизация;
- оцифровка процесса и автоматизация программного обеспечения;
- разблокирование потенциала в результате использования технологий и процессов, включая интернет вещей (IoT), датчики, облачные вычисления, мобильные устройства, гибкие разработки и дизайнерское мышление.

5.2. Трансформация металлургических заводов: роль инноваций и цифровизации

Металлургия – одна из ключевых отраслей промышленности, которая играет значимую роль в экономике страны. Заводы обеспечивают внутренний рынок и значительную долю экспорта. С каждым годом растет потребность в металлопродукции, а для развития отрасли требуется раз-

работка и применение инновационных технологий в производстве. Основными современными тенденциями в металлургии являются модернизация оборудования и внедрение новейших технологий, снижение вредных выбросов в атмосферу и улучшение экологии в промышленном регионе, переработка отходов и использование вторичного сырья, интенсификация, автоматизация, инновация и цифровизация производств. Все эти мероприятия повышают качество продукции и производительность, снижают затраты на энергоресурсы и позволяют осваивать новые рынки [70].

Определение и основные аспекты цифровой трансформации металлургических заводов

На многих заводах, особенно крупных металлургических комплексах, для производства конкурентоспособной продукции внедряется цифровизация – автоматизированное и цифровое управление производственными процессами в режиме реального времени с использованием интеллектуальных систем (цифровых устройств) без участия человека. Автоматически происходит сбор, сортировка и анализ информации по каждой операции, на основе которых принимаются оптимальные решения.

Роботизированные процессы сокращают потери рабочего времени и продолжительность технологических операций, способствуют быстрой адаптации предприятия к внешним изменениям и созданию конкурентных преимуществ. Производство становится приспособленным к современным реалиям и определяет наиболее востребованную продукцию на рынке в определенный период времени,

гибко подстраивается под выпуск особо востребованной металлопродукции.

Цифровая трансформация металлургических заводов включает несколько направлений [70]:

- искусственный интеллект – система, которая анализирует информацию, делает прогнозы и самостоятельно принимает решения. ИИ способен выявить потенциальные проблемы в производстве и предотвратить аварийность, оптимизирует параметры;

- интернет вещей – компьютерные сети и связанное с ними оборудование оснащено датчиками и контролирующими устройствами, необходимыми для сбора информации и обмена данными. Позволяет автоматически контролировать параметры металлоизделий;

- создание виртуальных моделей – цифровых двойников, копирующих реальные изделия. Это позволяет доработать и усовершенствовать вид продукции на компьютерном устройстве, не занимая ресурс предприятия;

- аддитивная технология – 3D-печать визуальных моделей, различных форм, индивидуальных изделий;

- с применением технологии блокчейн отслеживается происходящая ситуация и качество товаров, автоматически обрабатываются заявки, происходит управление заказами обработка платежей, что приводит к сокращению сроков поставок потребителям;

- большие данные – с помощью этой технологии обрабатывается огромный объем неструктурированной информации, интерпретируется и визуализируются данные.

Цифровая трансформация направлена на повышение производительности, рациональное использование ресурсов, соответствие мировым трендам и пр. Внедрение цифровых технологий сокращает влияние человеческого фактора и ускоряет выход продукции на внутренний и внешний рынок.

Примеры успешного применения цифровых технологий на металлургических заводах

Цифровизация добралась до отечественных металлургов. Вот несколько удачных примеров, где задействованы новые технологии:

1. На Череповецком металлургическом комбинате успешно внедрён программный комплекс по управлению темпом прокатки и выдачей слябов из печей на основе моделей машинного обучения. Данное решение получило название «Автотемп 2.0». Оно заменяет человека, проводя сложные расчёты в очень сжатые сроки.

2. На заводе «Уральская сталь» с помощью искусственного интеллекта и других цифровых технологий стали получать инновационную продукцию – криогенные и биметаллические марки сталей.

3. Магнитогорский металлургический комбинат (ММК) на всех этапах производственных процессов установил систему по сбору данных для дальнейшего анализа, благодаря чему создано оборудование для точного дозирования легирующих элементов в сплавах. С помощью цифровых устройств удалось оптимизировать закупку сырья, а при

помощи 3D-печати создать формы сложной конфигурации для отливки высококачественного металла.

4. На «ВИЗ-Стали» внедрили технологию предиктивной диагностики термического оборудования. Она позволяет оценивать состояние механических узлов и подшипников в реальном времени, заблаговременно устранять неисправности и минимизировать риски внеплановых простоев.

5. Цифровизация производства на предприятиях «Северстали» началась в 2017 году. За несколько лет флагман черной металлургии РФ «Северсталь» внедрила более 40 цифровых решений. Например, система на основе ИИ-технологии глубокого обучения с подкреплением на одном из агрегатов повысила его производительность на 6,5 %. Это примерно 100 тыс. т дополнительного металла в год. А применение моделей на основе экспертных правил, физического моделирования, машинного обучения и моделей регулирования с обратной связью подняли производительность другого агрегата на 3,4 %. Экономический эффект данного решения – более 100 млн [72–73].

Металлургическая отрасль вошла в топ-3 российских индустрий по уровню цифровизации. Активно разрабатываются отечественные импортонезависимые решения с адаптацией непосредственно под отечественное программное обеспечение. Основные направления цифровой трансформации из-за специфики отрасли приходятся на производственный процесс: цифровые двойники, машинное зрение, продвинутая аналитика и искусственный интеллект (ИИ) [73–74].

Инновация в металлургии: вызовы и новые возможности

Металлургическая отрасль особо реагирует на кризисы, которых в нашей стране за последние годы больше, чем когда-либо. На рынок металлов повлияли период пандемии, жесточайшие санкции, которые нарушили все логистические цепочки, сокращение экспорта. Все эти события негативно повлияли не только на отрасль, но и на экономику в целом. Возникли проблемы с изменением структуры и географией сбыта, с поставками и клиентами, с импортом оборудования и комплектующих. Но, несмотря на все трудности и препятствия, инвестирование в отрасль не прекратилось, спрос на металлопродукцию только растет.

В 2022 г. РФ на 26 млн долларов экспортировала черного металла, почти 4 млн т готовой продукции, в т.ч. плоского проката. Также растет экспорт редкоземельных металлов, без которых не обойтись в микроэлектронике, автомобильной и авиационной отрасли, в создании солнечных батарей и ветровых турбин.

Приоритетными задачами отрасли являются достижение технологического суверенитета, наращивание темпов производства и адаптация к новым реалиям времени. Российская отрасль металлургии остается одной из ведущих составляющих международного рынка и ее стратегическая цель – сохранить конкурентоспособность на длительное время. Для этого на предприятиях внедряются инновационные технологии, которые в большей степени влияют на развитие отрасли и ее дальнейшие перспективы.

Типы инноваций и их роль в развитии металлургической промышленности

Инновациями последних лет являются [70]:

- высокоэффективные печи для переработки шлаков и отходов цветных металлов, в том числе карусельного типа, снимающие напряжение в подовой части;

- индукционные плавильные агрегаты для получения новых высокопрочных сталей с разной химической модификацией;

- роботизированные системы и производственные линии;

- новые методы обработки металла, в т.ч. флотационная технология получения серебра из кеков цинкового производства;

- экологическая модернизация печей с внедрением фильтров от выхлопных газов;

- изготовление обсадных и компрессорных труб премиального класса, работающих в условиях экстремальных температур и давления;

- мембранная технология очистки сложных растворов с металлами от сульфатов;

- использование возобновляемых источников энергии в производстве;

- применение синтетических легкоплавких флюсов при плавке металла с целью рафинирования шлаков;

- поперечная клиноватая прокатка металла для изготовления высокоточных деталей оборудования.

Инновационные технологии способствуют разработке новых марок металла с повышенным качеством, выпуску современных изделий, помогают адаптироваться компаниям под условия, диктуемые мировыми трендами, и корректировать ранее утвержденные стратегии.

Проблемы и препятствия на пути внедрения инноваций

На экономический спад отрасли повлияли бурные экономические и политические события в 2022 г., которые заставили переориентировать промышленность на внутренний рынок и поменять поставки с Запада на Восток. В связи с этим пришлось понести потери и восстанавливаться, изыскивая пути для дальнейшего развития.

Так как металлургия – отрасль капиталоемкая, внедрение инноваций нуждается в больших инвестициях и помощи со стороны государства, что обуславливает первое препятствие.

Второе препятствие заключается в сложности новых технологий, поскольку для их разработки и внедрения требуются высококвалифицированные специалисты и много времени для их освоения.

Третье препятствие – использование чистых и «зеленых» технологий для отрасли, которая пока не отличается экологичностью, нужны большие финансовые вложения.

Технологические тренды в металлургии

Основные тренды в металлургии — это модернизация и внедрение цифровых технологий, выплавка легированных сталей любого состава в электродуговых печах или

конверторным методом – продувкой кислородом жидкого сплава.

Главной повесткой является автоматическое управление работой печей и обработка металла новым электрохимическим или магнитным импульсным способом, гидроабразивной или лазерной резкой, а также вторичная переработка сырья в связи с постепенным и неуклонным истощением ресурсов руды.

2023 год стал поворотным и определяющим для металлургической отрасли, как и для России в целом. Несмотря на все нынешние сложности, опрос руководителей горно-металлургических компаний свидетельствует о том, что лидеры отрасли единодушно сходятся во мнении: цифровизация – стратегический приоритет бизнеса. Около 40 % представителей компаний ожидают потенциальный рост инвестиций в цифровизацию в последующие несколько лет, и только 25 % прогнозируют сокращение расходов на ИТ-технологии. Для внедрения в ближайшие несколько лет представители горно-металлургической отрасли, прежде всего, выбрали технологии искусственного интеллекта, аналитики больших данных, продвинутой аналитики и машинного обучения [70–71 и др.].

В настоящий момент можно наблюдать, как меняются правила игры в экономической сфере, новые вызовы требуют от компаний нестандартных решений и значительных усилий. В условиях высокой неопределенности и турбулентности компании вынуждены заново выстраивать бизнес-процессы и выполнять свои социальные обязательства.

В последнее время наблюдается встраивание в корпоративные стратегии экологической и социальной составляющей в разрезе концепции ESG, поскольку производство металлов сопряжено с загрязнением окружающей среды вредными выбросами, сокращение которых становится в настоящий момент одним из ключевых показателей эффективности управления и внедрения цифровых технологий. При этом работа предприятия по достижению целей устойчивого развития напрямую влияет на инвестиционную привлекательность и репутацию отечественных компаний, особенно в рамках мирового рынка [73; 75].

В металлургии РФ отмечается высокая инновационная активность в сфере применения технологий Индустрии 4.0 для повышения эффективности производственных процессов и обеспечения цифровой зрелости отрасли. Несмотря на сложное состояние металлургии в новых геополитических условиях, эксперты и представители отрасли довольно положительно оценивают дальнейший рост внедрения цифровых отраслевых продуктов с планируемым смещением вектора на снижение издержек [73; 75].

Главными цифровыми технологиями в металлургии являются в первую очередь платформы Индустрии 4.0, позволяющие получать как экономические и операционные эффекты, так и социальные, экологические и репутационные, что соответствует глобальным трендам цифровизации. Наблюдается применение таких сквозных решений в металлургической отрасли, как создание цифровых экосистем и маркетплейсов металлопродукции, повышающих

клиентский опыт. Во многом сохраняется приоритет развития технологий ИИ, интернета вещей, аналитики, больших данных и цифровых двойников [73].

Цифровизация затрагивает все сферы жизни общества и человека. Исключением не является и металлургия. Так, цифровизация металлургической промышленности будет проводиться по следующим направлениям [76]:

- полная автоматизация всех агрегатов, цехов и комбинатов металлургических предприятий;
- использование роботов в опасных зонах, что значительно повысит безопасность труда на рабочих местах;
- внедрение системы мониторинга состояния оборудования и дополненной реальности, которые упростят работы по обслуживанию и ремонту;
- масштабное применение искусственного интеллекта, которое основывается на использовании больших данных;
- сквозная оптимизация технологических процессов за счёт применения системы правил.

Цифровизация металлургии должна привести в конечном итоге к сведению дефектов конечной продукции до крайне незначительного уровня [76].

Цифровизация в металлургии позволяет предприятиям адаптироваться к глобальным трендам, быть гибкими и адаптивными к меняющимся условиям рынка, повышать эффективность, мощность, производительность, качество продукции, расширять ассортимент, снимать риск сбоев и аварий, уменьшать затраты на производство и учитывать экологический аспект развития отрасли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифровизация в металлургии позволяет предприятиям адаптироваться к глобальным трендам, быть гибкими и адаптивными к меняющимся условиям рынка, повышать эффективность, мощность, производительность, качество продукции, расширять ассортимент, снимать риск сбоев и аварий, уменьшать затраты на производство и учитывать экологический аспект развития отрасли.

Цифровизация металлургии должна привести в конечном итоге к сведению дефектов конечной продукции до крайне незначительного уровня.

Вследствие того, что производство металлов сопряжено с загрязнением окружающей среды вредными выбросами, трансформация металлургии способствует встраиванию в корпоративные стратегии металлургических компаний экологическую и социальную составляющие в разрезе концепции ESG как одних из ключевых показателей эффективности управления и внедрения цифровых технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние примесей. – URL: https://www.msun.ru/dir/kaf_tm/educate/labrab_6/theory/teoriya24.html (дата обращения: 12.04.2024).

2. Легирующие элементы и примеси в сталях: краткий справочник. – URL: <https://spk-region.ru/blog/legiruyushchie-elementy-i-primesi-v-stalyakh-kratkiy-spravochnik.html> (дата обращения: 12.04.2024).

3. Макаров, М.И. Полезные и специальные примеси в стали / М.И. Макаров. – URL: <https://vt-metall.ru/articles/513-vrednye-primesi-v-stali/> (дата обращения: 12.04.2024).

4. Основные физико-химические процессы при производстве. – URL: <https://studylib.ru/doc/2351354/1.6-osnovnye-fiziko-himicheskie-processy-pri-proizvodstve> (дата обращения: 12.04.2024).

5. Случайные примеси в сталях. – URL: <https://otlivka.info/articles/примеси-в-стали-случайные/> (дата обращения: 12.04.2024).

6. Ликвация серы в стали. – URL: <https://otlivka.info/articles/ликвация-в-стали/> (дата обращения: 12.04.2024).

7. Белевитин, В.А. Материаловедение. Свойства металлов и сплавов: учебн. пособие / В.А. Белевитин. – Челябинск: Изд-во Челябинского государственного педагогического университета, 2012. – 236 с.

8. Ликвация и влияние примесей на свойства стали. – URL: <https://privetstudent.com/referaty/proizvodstvo/34-likvatsiya-i-vliyanie-primesej-nasvoystva-stali.html> (дата обращения: 14.04.2024).

9. Металлография. – URL: <http://structure.by/index.php/studentam/o-metallakh-i-nemetallakh/144-nitridy-v-stali> (дата обращения: 14.04.2024).

10. Чегуров, М.К. Основы фрактографического анализа изломов образцов из конструкционных сплавов: учеб. пособие / М.К. Чегуров, С.А. Сорокина. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. – 79 с.

11. Модифицирование стали редкоземельными элементами. – URL: http://steelcast.ru/rare_earth_elements_modifying (дата обращения: 14.04.2024).

12. Ishiguro, K. Modification of steel with rare earth elements / K. Ishiguro, M. Ito, T. Usuga // Trans ISIJ, 1976. – No 16. – P. 359–367.

13. Модифицирование стали. – URL: <https://www.webkursovik.ru/kartgotrab.asp?id=-178466> (дата обращения: 14.04.2024).

14. Волков, А.И. Анализ использования редкоземельных металлов в чёрной металлургии России и мира / А.И. Волков, П.Е. Стулов, Л.И. Леонтьев, В.А. Углов // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. 2020. – Т. 63. – № 6. – С. 405-418. – URL: <https://fermet.misis.ru/jour/article/viewFile/1902/1393> (дата обращения: 15.04.2024).

15. Голубцов, В.А. Применение продукции компании НПП при модифицировании стали / В.А. Голубцов, А.Я. Дынин, Т.В. Рогожина и [др.] // Литье и металлургия. – 2009. – № 3 (52). – С. 245–253. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/16130/C.%20245-253.pdf?sequence=1> (дата обращения: 16.04.2024).

16. Голубцов, В.А. Теория и практика введения добавок в сталь вне печи / В.А. Голубцов. – Челябинск, 2006.

17. Рябчиков, И.В. Модификаторы и технология внепечной обработки железоуглеродистых сплавов / И.В. Рябчиков. – Москва: Экомет, 2008.

18. Слuzов, П.А. Об эффективности модифицирования и микролегирования чугуна / П.А. Слuzов, В.К. Седунов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – № 2 (109) – С. 234–241. – URL: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2015/02/234-241.pdf> (дата обращения: 16.04.2024).

19. Голубцов, В.А. Щелочноземельные металлы в технологии внепечной обработки стали / В.А. Голубцов, И.В. Рябчиков, И.В. Бакин и [др.] // Сб-к трудов XV международного конгресса сталеплавильщиков и производителей металла. Москва–Тула. – 2018. – С. 332–337. – URL: <https://litkons.com/info/steel/shchelochnozemelnye-metally-v-tekhnologii-vnerechnoy-obrabotki-stali/> (дата обращения: 16.04.2024).

20. Чернов, В.С. О механизме модифицирования металлов / В.С. Чернов, Ф.И. Бусол // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. 1975. – № 2. – С. 71–75.

21. Аналитический сканирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA. – URL: <https://tescan.ru/product/skaniyuushchie-elektronnye-mikroskopy/tescan-vega/> (дата обращения: 17.04.2024).

22. Ершов, Г.С. Структурообразование и формирование свойств сталей и сплавов / Г.С. Ершов, Л.А. Позняк. – Киев: Наукова Думка, 1993. – 386 с.

23. Чернявский, М.С. Модифицирование стали 20ГЛ карбонатами барий-стронциевыми / М.С. Чернявский, Д.Ю. Пимнев, С.И. Кузнецов и [др.]. – URL: <https://otlivka.info/articles/модифицирование-стали-20гл-барий-строн/>; <http://www.ruscastings.ru/work/168/2130/2968/44308> (дата обращения: 17.04.2024).

24. Куницын, Г.А. Применение комплексных модификаторов при производстве стали с повышенными требованиями по неметаллическим включениям / Г.А. Куницын, М.С. Кузнецов, А.Н. Шаповалов, И.В. Бакин // Чёрные металлы. – 2022. – № 5. – С. 9–16.

25. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям производства чугуна, стали и ферросплавов. – URL: <https://e-ecolog.ru/docs/H8WYEwnIхGPfP8VGhzdgi> (дата обращения: 19.04.2024).

26. Гамов, П.А. Производство стали в кислородных конвертерах: решение практических задач: учебн. пособие / П.А. Гамов, С.В. Зырянов, С.П. Салихов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – 47 с.

27. Снегирев, Ю.В. Моделирование расплавления реагентов в сталеразливочном ковше при внепечной обработке / Ю.В. Снегирев, В.Д. Тутарова // Приволжский научный вестник. 2011. – № 2. – С. 16–22. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rasplavleniya-reagentov-v-stalerazlivivo>

chnom-kovshe-pri-vneprechnoy-obrabotke (дата обращения: 19.04.2024).

28. Ковшевая металлургия. – URL: <https://dzen.ru/a/ZLAEwSs-TiAvDBqR> (дата обращения: 19.04.2024).

29. Еронько, С.П. Расчет и конструирование оборудования для внепечной (ковшовой) обработки и разлива стали / С.П. Еронько, С.В. Быковских, Е.В. Ошовская. Киев: Техника, – 2007. – URL: <https://markmet.ru/kniga-po-metallurgii/raschet-i-konstruirovaniye-oborudovaniya-dlya-vneprechnoi-obrabotki-i-razlivki-st> (дата обращения: 19.04.2024).

30. Защита струи разливаемой стали от воздействия на неё воздуха. – URL: <https://2uch.ru/textbook/pero/gbe/ajur> (дата обращения: 19.04.2024).

31. Ромашкин, А.Н. Защита металла от вторичного окисления / А.Н. Ромашкин. – URL: <https://2uch.ru/textbook/pero/gbe/ajur> (дата обращения: 19.04.2024).

32. Агрегат «ковш-печь». – URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=603889#text> (дата обращения: 19.04.2024).

33. Доводка стали в агрегате ковш-печь. – URL: <https://uas.su/books/2011/kslitok/14/razdel14.php> (дата обращения: 19.04.2024).

34. Агрегат «ковш-печь». – URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/431419> (дата обращения: 19.04.2024).

35. Основные способы вакуумирования стали. – URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=871274#text> (дата обращения: 19.04.2024).

36. Кньюпель, Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Ч. II. Основы и технология ковшовой металлургии;

пер. с нем. / Г. Кноппель – Москва: Metallurgia, 1984. – С. 172–200.

37. Решетов, В.И. Ковшовые вакууматоры в СССР и за рубежом / В.И. Решетов, А.В. Протасов // Обзор ЦНИИТЭИтяжмаш, – 1982. – № 31. – 44 с.

38. Братковский, Е.В. Электрометаллургия стали и спецэлектрометаллургия / Е.В. Братковский, А.В. Заводяный. – Новотроицк: НФ МИСиС, 2008. – 115 с.

39. Протасов, А.В. Порционные и циркуляционные вакууматоры / А.В. Протасов // Энциклопедия «Машиностроение», Т. IV-5 «Машины и агрегаты металлургического производства». – Москва: Машиностроение, 2000. – С. 109–127.

40. Морозов, А.П. Совершенствование комплексной обработки стали в циркуляционных вакууматорах: монография / А.П. Морозов, Е.Б. Агапитов. – Магнитогорск: МГТУ, 2002. – 73 с.

41. Агрегаты внепечной обработки стали. – URL: <http://inmetgroup.com/nashi-kompetenczii/chernaya-i-czvetnaya-metallurgiya/agregaty-vnepечноj-obrabotki-stali/> (дата обращения: 21.04.2024).

42. Агрегаты VD/VOD – Вакуумная дегазация для обеспечения максимальной металлургической гибкости. – URL: <https://www.primetals.com/ru/portfolio/proizvodstvo-stali/vnepечноj-obrabotka-stali> (дата обращения: 21.04.2024).

43. Электрические и конструктивные особенности установки печь-ковш фирмы NSC // Реферативный журнал ВИНТИ Производство чугуна и стали; – 1989. – № 11. – С. 64.

44. Агапитов, Е.Б. Развитие системы управления электродуговой установкой печь-ковш с целью повышения нагрева / Е.Б. Агапитов // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. – № 4. – С. 81–84.

45. Меркер, Э.Э. Патент РФ RU Способ азотирования жидкой стали в ковше № 2369644 С2 / Э.Э. Меркер и др. // Бюллетень №28. – 10.10.2009.

46. Бигеев, В.А. Патент на полезную модель «Установка печь-ковш» № 2006138419.22 / В.А. Бигеев, Е.А. Агапитов, М.М. Ерофеев и др. // Бюллетень № 9. – 27.03.2007. – С. 597.

47. Карпенко, Г.А. Патент РФ RU Агрегат комплексной обработки жидкой стали № 2532243 / Г.А. Карпенко, В.О. Казарцев, Э.Э. Меркер. – URL: <https://findpatent.ru/patent/253/2532243.html> (дата обращения: 21.04.2024).

48. Колемасова, Ю.А. Реструктуризация сталеплавильного производства / Ю.А. Колемасова, И.В. Аленкова // Научное периодическое издание «IN SITU»; – 2015. – № 5. – С. 1–4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/restrukturizatsiya-staleplavilnogo-proizvodstva/viewer> (дата обращения: 24.04.2024).

49. Способы производства стали. – URL: https://chelyabinsk.hardhub.ru/articles/_stali/*_sposoby-proizvodstva-stali/?_gl=1*xgy50*_ga*MTk3OTk4MTc4MC4xNzEwNzQ5MzA2*_ga_K00VKRMQP6*MTcxMzkzNjgyNC4yLjAuMTcxMzkzNjgyNC42MC4wLjA (дата обращения: 24.04.2024).

50. Производство стали. – URL: <http://mining-prom.ru/rud/stal/proizvodstvo-stali/> (дата обращения: 24.04.2024).

51. Специальные способы выплавки стали. – URL: <https://lektzia.com/2x69c7.html> (дата обращения: 24.04.2024).

52. Дуговая сталеплавильная печь — электрическая плавильная печь. – URL: <https://nova.rambler.ru/search?query=%D0D1%> (дата обращения: 24.04.2024).

53. Вакуумирование стали. – URL: <https://metallurgist.pro/vakuumirovanie-stali> (дата обращения: 27.04.2024).

54. Обработка стали инертным газом. – URL: <https://uas.su/books/metstali/182/razdel182.php> (дата обращения: 27.04.2024).

55. Metallургическое производство. – URL: <https://extxe.com/5447/metallurgicheskoe-proizvodstvo-2/> (дата обращения: 27.04.2024).

56. Концепция развития внепечной обработки и непрерывной разливки стали. – URL: <https://www.mcsena.ru/blog/tehnologii-obrabotki-stali/konceptsiya-razvitiya-vnepechnoj-obrabotki-i-nepreryvnoj-razlivki-stali> (дата обращения: 27.04.2024).

57. Печи для спецметаллургии. – URL: <https://magma-tex.ru/vacuumarcfurnace> (дата обращения: 28.04.2024).

58. Плазменно-дуговая плавка. – URL: <https://metallurgist.pro/plazmenno-dugovaya-plavka> (дата обращения: 28.04.2024).

59. Электронно-лучевое плавление. – URL: <https://www.ald-vt.com/ru/portfolio/engineering/vacuum-metallurgy/electronbeam-melting-furnace-eb-melting/> (дата обращения: 30.04.2024).

60. Филимоненко, А.Н. Вакуумные индукционные печи. Область применения / А.Н. Филимоненко // Литьё и металлургия. 2012. – № 3 (67). – С. 248–250.

61. Электронно-лучевой переплав. Получение металла. – URL: <https://metallplace.ru/about/stati-o-chnoy-metalurgii/elektronnoluchevoy-pereplav-poluchenie-metalla/> (дата обращения: 28.04.2024).

62. Электронно-лучевое плавление компании ALD. – URL: <https://www.ald-vt.com/ru/portfolio/engineering/vacuummetallurgy/electron-beam-melting-furnace-eb-melting/> (дата обращения: 28.04.2024).

63. Петижев, А.Д. Влияние технологического прогресса на стратегическую устойчивость металлургических предприятий / А.Д. Петижеев // Московский экономический журнал. – 2020. – № 7. – С. 1–9.

64. Попова, А.А. Цифровизация работы предприятий металлургической отрасли как основа их финансовой результативности / А.А. Попова, Е.А. Аксёнова // Электронный научно-экономический журнал. 2022. – Т. 10. – № 9. – С. 1–7.

65. Плещенко, В.И. Перспективы и ограничения применения принципов совместной экономики на предприятиях черной металлургии в условиях цифровизации / В.И. Плещенко // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – № 75(6). – С. 741–747.

66. Романова, О.А. Цифровизация производственных процессов в металлургии: тенденции и методы измерения /

О.А. Романова, Д.В. Сиротин // Известия УГГУ. – 2021. – №. – 3 (63). – С. 136–148. [SEP]

67. Ревенко, Н.С. Глобальные тенденции цифровой трансформации горнодобывающей и металлургической отраслей / Н.С. Ревенко // Информационное общество. – 2020. – № 4–5. – С. 76–84. [SEP]

68. Беликова, К.М. Цифровая интеллектуальная экономика: понятие и особенности правового регулирования (теоретический аспект) / К.М. Беликова // Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление. – 2018. – № 8 (99). – С. 82–85. [SEP]

69. Сергеев, Л.И. Цифровая экономика: учебник для вузов / Л.И. Сергеев, Д.Л. Сергеев, А.Л. Юданова; под редакцией Л.И. Сергеева. – 2-е изд. – Москва: Юрайт, 2023. – 437 с. [SEP]

70. Трансформация металлургических заводов: роль инноваций и цифровизации. – URL: <https://fabricators.ru/article/transformaciya-metallurgicheskikh-zavodov-rol-innovacij-i-cifrovizacii> (дата обращения: 30.04.2024).

71. Обзор состояния цифровизации горно-металлургической отрасли в России. – 2023. – URL: <https://tedo.ru/metals-mining-digitalization> (дата обращения: 30.04.2024).

72. Цифра и металл: как идет трансформация российской промышленности. – URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/cmrm/6318873b9a7947313ae863c0?from=copy> (дата обращения: 30.04.2024).

73. Прохорова, И.С. Цифровая зрелость металлургической отрасли России: драйверы и проблемы роста в новых

геополитических условиях. Ч. II. Ключевые направления цифровой трансформации / И.С. Прохорова, В.С. Устинов, А.В. Елхова // Вестник университета. – 2023. – № 12. – С. 44–52.

74. Сплав технологий: 5 трендов цифровизации в металлургии. – URL: <https://sber.pro/publication/splav-tehnologii-5-trendov-tsifrovizatsii-v-metallurgii/> (дата обращения: 30.04.2024).

75. Терпугов, А.Е. Развитие механизма управления рыночными стратегиями российской металлургической отрасли в современных условиях / А.Е. Терпугов // Вестник университета. – 2022. – № 10. – С. 177–184.

76. Металлургия будущего. – URL: https://spravochnick.ru/upravlenie_kachestvom/metallurgiya_budushego/ (дата обращения: 30.04.2024).

77. Белевитин, В.А. Ультразвуковой контроль качества кованых валов / В.А. Белевитин, Н.И. Бражников // Сталь. – 2000. – № 4. – С. 47–48.

78. Голубчик, Р.М. О выборе оптимального соотношения диаметров валков и заготовки для винтовой прокатки / Р.М. Голубчик, В.К. Воронцов, В.А. Белевитин // Сталь. – 1982. – № 8. – С. 64–66.

79. Смирнов, Е.Н. Развитие подходов к исследованию на физических моделях механизмов «залечивания» дефектов сплошности осевой зоны непрерывнолитой заготовки / Е.Н. Смирнов, В.А. Скляр, В.А. Белевитин и [др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59. – № 5. – С. 322–327.

Учебное издание

Владимир Анатольевич Белевитин

**Инновационные технологии трансформации
качества конструкционных материалов**

Учебное пособие

ISBN ISBN 978-5-907869-11-0

Работа рекомендована РИС ЮУрГГПУ
Протокол № 30 2024 г.

Редактор Е.М. Сапегина

Компьютерная верстка В.А. Белевитин

Фото на обложке:

<https://www.uas.su/articles/ukp/00001/00001.php>

Издательство ЮУрГГПУ

454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69

Подписано в печать 17.05.2024 г.

Формат 60x84 1/16

Объем 6,15 уч.-изд. л. – 12,15 усл.п.л.

Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ЮУрГГПУ

454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69