

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИСИС»

Кафедра металлургических технологий и оборудования

А.Н. Шаповалов

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Новотроицк, 2024 г.

УДК 669.18
ББК 34.327
Ш 24

Рецензенты:

*Начальник электросталеплавильного отдела управления технического сопровождения производства (УТСП) дирекции по технологии и качеству АО «Уральская Сталь», к.т.н.
М.С. Кузнецов*

*Доцент кафедры металлургических технологий и оборудования Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», к.т.н., доцент
Е.В. Братковский*

Шаповалов, А.Н. Теория и технология разливки стали: учебное пособие. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСИС», 2024. – 128 с.

Учебное пособие раскрывает основное содержание дисциплин «Теория и технология разливки стали», «Разливка и кристаллизация стали» и предназначено для самостоятельного изучения студентами направления подготовки 22.03.02 Металлургия технологии подготовки стали к разливке, общих закономерностей кристаллизации стали, конструкции, технологии и показателей разливки стали в изложницы и непрерывным способом. По каждой рассмотренной в пособии теме изложены основные теоретические положения и представлены вопросы для контроля знаний, что облегчает усвоение теоретических знаний и помогает подготовке к мероприятиям по текущему контролю и промежуточной аттестации.

Материал учебного пособия подготовлен на основе трудов ведущих специалистов в области технологии разливки стали.

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСИС».

© ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Новотроицкий филиал, 2024

Содержание

Введение	5
Тема 1 Требования к качеству разливаемой стали и способы ковшевой обработки	6
1.1 Разливка стали как этап технологического процесса производства	6
1.2 Раскисление стали	8
1.3 Дегазация стали	13
1.4 Неметаллические включения в стали и их модифицирование	17
1.5 Легирование стали.....	20
1.6 Продувка металла инертным газом	22
1.7 Удаление вредных примесей (сера и фосфор)	24
1.8 Вакуумная обработка стали.....	28
1.9 Комплексная обработка стали в ковше	33
1.10 Процессы, происходящие во время выпуска и разливки стали.....	35
1.11 Контрольные вопросы для самопроверки.....	37
Тема 2 Основные положения теории кристаллизации	39
2.1 Сущность кристаллизации и условия зарождения кристаллов	39
2.2 Условия роста кристаллов и закономерности формирования структуры затвердевшего металла.....	42
2.3 Интервал и скорость кристаллизации	44
2.4 Контрольные вопросы для самопроверки.....	45
Тема 3 Способы разливки и их сравнительная характеристика.....	47
3.1 Способы разливки стали	47
3.2 Сравнение способов разливки стали в изложницы	49
3.3 Сравнение разливки стали в изложницы и непрерывной разливки стали.....	51
3.4 Контрольные вопросы для самопроверки.....	53
Тема 4 Закономерности затвердевания НЛЗ, структурная и химическая неоднородность	54
4.1 Тепловой баланс затвердевания непрерывнолитой заготовки	54
4.2 Условия затвердевания непрерывнолитой заготовки в кристаллизаторе ..	54
4.3 Условия затвердевания в зоне вторичного охлаждения	57
4.4 Химическая неоднородность НЛЗ	60
4.5 Особенности структуры и химической неоднородности в НЛЗ	62
4.6 Контрольные вопросы для самопроверки.....	65
Тема 5 Классификация и устройство МНЛЗ	67
5.1 Классификация МНЛЗ	67
5.2 Основные узлы МНЛЗ. Оборудование для быстрой смены ковшей	69
5.3 Оборудование для быстрой смены ковшей	70
5.4 Промежуточный ковш МНЛЗ	71

5.5 Кристаллизатор с механизмом качания	77
5.6 Зона вторичного охлаждения МНЛЗ.....	81
5.7 Тянуще-правильная клеть и порезка заготовки. Затравка.	86
5.8 Контрольные вопросы для самопроверки.....	88
Тема 6 Сравнительная характеристика МНЛЗ и технология непрерывной разливки.....	91
6.1 Сравнительная характеристика МНЛЗ с различным расположением технологической оси	91
6.2 Технология и показатели непрерывной разливки стали	97
6.3 Контрольные вопросы для самопроверки.....	104
Тема 7 Качество непрерывнолитой заготовки и направления совершенствования непрерывной разливки	106
7.1 Качество непрерывнолитой заготовки	106
7.2 Совершенствования техники и технологии непрерывной разливки	113
7.3 Контрольные вопросы для самопроверки.....	115
Тема 8 Литейно-прокатные комплексы	117
8.1 Совмещение непрерывной разливки и прокатки	117
8.2 Листовые литейно-прокатные комплексы	118
8.3 Валковые (роликовые) и ленточные установки непрерывной отливки полосы.....	122
8.4 Контрольные вопросы для самопроверки.....	126
Список использованных источников	127

Введение

Разливка стали является завершающей операцией (стадией) технологического процесса производства литых или кованных стальных заготовок сталеплавильного производства. От правильности и обоснованности выбора технологии разливки стали зависят не только производительность сталеплавильного подразделения (участка, цеха, завода) и качество металлопродукции, но, в конечном счете, и рентабельность всего металлургического производства. Некорректно выбранным режимом разливки можно перечеркнуть все усилия предыдущих переделов, что особенно остро ощущается в условиях производства полного металлургического цикла. Это характерно, например, для условий производства стали на АО «Уральская Сталь».

Целью настоящего учебного пособия является систематизация достижений мировой и отечественной науки и практики в области разливки стали, создании и реализации технологических циклов производства конкурентоспособных металлоизделий. В учебном пособии представлены требования к качеству разливаемой стали и способы ковшевой обработки, основные положения теории кристаллизации, способы разливки и их сравнительная характеристика, закономерности затвердевания непрерывнолитой заготовки и её структурные характеристики, конструктивные особенности современных машин непрерывного литья заготовок и технология непрерывной разливки стали, показатели качества непрерывнолитой заготовки и направления совершенствования непрерывной разливки.

Разумеется, представленный в пособии лекционно-практический материал не охватывает всего разнообразия и модификаций процесса разливки с позиции повышения производительности сталеплавильного цеха и качества отливаемых заготовок. Однако данный материал является тем базисным начальным уровнем подготовки бакалавров по направлению Металлургия, который необходимо освоить для дальнейшего развития представлений и понимания сущности процессов, сопровождающих технологии разливки и внепечной обработки стали. Материал подобран и систематизирован таким образом, что становится возможным самостоятельное изучение процесса разливки стали без обращения к изданиям-первоисточникам.

Курс ориентирован на подготовку бакалавров по направлению 22.03.02 Металлургия, обучающихся по профилю «Металлургия черных металлов».

Тема 1 Требования к качеству разливаемой стали и способы ковшевой обработки

1.1 Разливка стали как этап технологического процесса производства

Выплавленный в сталеплавильном агрегате стальной полупродукт выпускают в разливочный ковш и далее, после проведения операций ковшевой обработки (раскисления, легирование, дегазация, десульфурация, вакуумирование, модифицирование) полученную сталь разливают в стационарные металлические формы – изложницы или направляют на машины непрерывной разливки.

В результате затвердевания стали в изложницах получают стальные слитки, которые представляют собой стальные отливки в виде усеченной пирамиды. Продуктом непрерывной разливки являются непрерывнолитые заготовки, которые в отличие от слитков характеризуются постоянным по длине сечением. Полученные слитки и заготовки в дальнейшем подвергают термомеханической обработке (ТМО), которая предполагает сочетание различных способов обработки металлов давлением (ОМД) и режимов термической обработки (ТО) с получением конечной продукции (лист, сортовой прокат, труба и т.д.) с заданными свойствами.

Эффективность термомеханической обработки определяется выходом годного и получением заданных эксплуатационных свойств изделия:

1. Выход годного в ходе ТМО определяется:

- способом ОМД и технологией термомеханической обработки;
- качеством исходной заготовки/слитка (содержанием вредных примесей, газов, наличием внутренних пор и трещин, неметаллических включений).

2 Эксплуатационные свойства изделия определяются:

- правильным выбором химического состава стали (именно это определяет разнообразие марок сталей);
- правильным выбором технологии термомеханической обработки и её соблюдением;
- качеством исходной заготовки/слитка (содержанием вредных примесей, газов, наличием внутренних пор и трещин, неметаллических включений).

Таким образом, качество слитка/заготовки, во многом определяет результат термомеханической обработки и качество изделия.

В свою очередь, качество слитка/заготовки зависит от:

- конструктивных особенностей разливочного оборудования;
- соблюдения технологии подготовки оборудования к разливке;
- параметров разливки;
- качественных параметров разливаемого металла (содержание вредных примесей, газов, неметаллических включений и др.).

Таким образом, технология и организация разливки в значительной степени определяют качество литого слитка/заготовки, количество отходов при дальнейшем переделе (выход годного) и эксплуатационные свойства готового изделия. В зависимости от качества исходного металла и технологии разливки от 5 до 25 % всей выплавляемой стали возвращается в переплав из-за дефектов «сталеплавильного» происхождения, связанных с отклонениями по составу металла, наличию поверхностных и/или внутренних дефектов заготовки, возникающих в процессе разливки. Поэтому важнейшей составной частью технологии производства качественного слитка/заготовки является подготовка стали к разливке.

Качество слитка или непрерывнолитой заготовки определяется как параметрами разливки, так и характеристиками разливаемого металла – его температурой, составом, наличием вредных примесей и неметаллических включений (НВ). Поэтому очень важно не только выплавить сталь, но и обеспечить благоприятные условия разливки.

Требования к разливаемому металлу:

1. оптимальная температура перегрева металла (над температурой плавления), заливаемого в форму – 10-30 °С;
2. однородность по химическому составу и температуре;
3. минимальное содержание вредных примесей (сера, фосфор);
4. минимальное содержание неметаллических включений (оксисульфидных, крупнокристаллических силикатных, глиноземистых и др.);
5. минимальное содержание растворенных газов – кислород, азот и водород.

Достижение этих требований непосредственно в сталеплавильных агрегатах усложняет ведение плавки и увеличивает ее продолжительность, а в ряде случаев невозможно по технологическим условиям (например, в конвертере). Поэтому на большинстве современных металлургических предприятий достижение заданных требований к жидкой стали обеспечивается поэтапно:

– на первом этапе в сталеплавильном агрегате получают полупродукт, удовлетворяющий требованиям по содержанию углерода и фосфора, а также имеющий температуру, обеспечивающую возможность его дальнейшей обработки (с учетом теплотерь на всех этапах ковшевой обработки и разливки);

– на втором этапе различными методами ковшевой обработки производят окончательную доводку металла по химическому составу и температуре в сталеразливочном ковше.

Сталеразливочный ковш – футерованная изнутри емкость (с формой усеченного конуса) с выпускным отверстием в днище, перекрываемым шиберным затвором или стопором, предназначенная для приема металла, кратковременного хранения, транспортировки, дополнительного рафинирования и разливки.

Такое разделение процессов (сталеплавильный агрегат – операции ковшевой обработки) позволяет не только добиться требуемого состава металла (с большей эффективностью, чем в печи/конвертере), но и существенно улучшить показатели работы сталеплавильных агрегатов, ограничивая их задачи проведением окислительного рафинирования и нагрева металла. Таким образом, разделение задач сталеплавильного производства по отдельным агрегатам обеспечивает максимальную эффективность решения задач и ритмичность производства.

В настоящее время наиболее широко используются следующие технологии ковшевой обработки стали:

- раскисление стали на выпуске (как правило «глубинным способом»);
- легирование (изменение химического состава введением легирующих элементов) и модифицирование (воздействие на процесс кристаллизации и структуру стали через изменение состава и формы неметаллических включений) стали;
- продувка инертным газом с целью дегазации, удаления неметаллических включений, выравнивания химического состава и температуры;
- вакуумирование с целью дегазации и глубокого обезуглероживания;
- обработка стали синтетическими шлаками и шлакообразующими смесями;
- продувка стали порошкообразными материалами;
- комплексная обработка стали.

Наилучшие результаты воздействия на качество металла достигаются при использовании комбинированных способов ковшевой обработки, когда в одном или нескольких, последовательно расположенных агрегатах, осуществляется ряд операций.

1.2 Раскисление стали

В ходе окислительного рафинирования металл неизбежно насыщается кислородом (до 0,1 % и более), концентрация которого увеличивается к концу плавки по мере нагрева и обезуглероживания металла. Однако при охлаждении металла, и, особенно, при его затвердевании, растворимость кислорода резко снижается, достигая при обычных условиях ($< 10^{-4}$ %). В итоге избыточный кислород выделяется из раствора и реагирует с примесями металла с образованием мелкодисперсных оксидных неметаллических включений, ухудшающих механические свойства стали.

Для устранения отрицательного влияния кислорода осуществляют *раскисление стали*, которое заключается в удалении кислорода из металла или связывании его в прочные оксиды глобулярной формы, влияние которых на свойства

стали незначительно.

По степени раскисленности, характеризующей полноту удаления из металла растворенного в нем кислорода, стали подразделяют «кипящие», «спокойные» и «полуспокойные».

В современном производстве стали применяют следующие способы раскисления стали: глубинное (осаждающее), диффузионное (обработкой синтетическими шлаками) и вакуумно-углеродное (обработкой вакуумом).

Глубинное (осаждающее) раскисление стали заключается в связывании растворенного в стали кислорода в нерастворимые оксиды в результате введения в металл элемента-раскислителя с последующим удалением продуктов раскисления (оксидов) в шлак. Если условно обозначить элемент-раскислитель через Р, то процесс глубинного раскисления в общем виде можно описать реакцией $[O] + P = (PO) + Q$.

Образующиеся в результате реакций раскисления малорастворимые в металле оксиды (РО), имеющие низкую в сравнении с металлом плотность, всплывают в шлак или выносятся конвективными потоками металла. Происходит отделение новой шлаковой фазы, напоминающее образование осадка в низкотемпературных физико-химических процесса – отсюда название метода «осаждающий». Введение раскислителей в глубину металла предопределило другое название этого способа раскисления – «глубинное».

Для успешного проведения раскисления, элементы, используемые в качестве раскислителей, должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- иметь высокое химическое сродство к кислороду (раскислительную способность), больше чем у железа;
- обеспечивать образование нерастворимых в металле оксидов с минимальной плотностью и температурой плавления, что облегчает их удаление из расплава (минимизирует количество неметаллических включений) или обеспечивает получение включений глобулярной формы;
- иметь низкую стоимость и доступность (недефицитность);
- обладать способностью к улучшению свойств стали;
- способствовать уменьшению отрицательного влияния на свойства стали других вредных (серы, азота, водорода);
- продукты раскисления, оставаясь в стали, должны способствовать измельчению зерна.

В настоящее время нет ни одного раскислителя, который был бы наилучшим по всем предъявляемым требованиям. Поэтому в производственной практике при выборе элементов-раскислителей исходят из их стоимости и доступности, и наиболее часто раскисление спокойной стали проводят введением в

металл на выпуске трех элементов – **марганца, кремния, алюминия (и их сплавов)**. Расход марганца и кремния выбирается так, чтобы остаточное содержание этих элементов в металле после раскисления находилось в пределах, установленных для выплавляемой стали (для углеродистой стали 0,4-0,6 % Mn и 0,17-0,35 % Si) с учетом их угара, а расход алюминия составляет 250-350 г/т, повышаясь по мере снижения концентрации углерода. Марганец и кремний вводится в металл в виде ферросплавов, а алюминий – в виде слитков, гранул, проволоки или сплавов с кремнием, кальцием и др.

Наиболее полное усвоение раскислителей обеспечивается при следующем режиме их введения в ковш:

- раскислители необходимо вводить равномерно в период наполнения от 20 до 50 % объема ковша;

- подачу раскислителей следует проводить последовательно по мере роста их раскислительной способности – сначала в металл вводится марганец, имеющий относительно невысокое сродство к кислороду, затем кремний и в последнюю очередь алюминий, являющийся наиболее сильным раскислителем;

- температура металла на выпуске должна быть минимальной с учетом необходимого перегрева для компенсаций тепловых потерь при раскислении и последующих технологических операций;

- усвоение раскислителей, особенно сильных (алюминий и др.), повышается при их введении вглубь металла в виде проволоки или гранул (в струе инертного газа);

- при расчете расхода раскислителей необходимо учитывать остаточное содержание в металле после продувки тех элементов, которые вносятся ферросплавом, а также учитывать их угар (таблица 1).

Таблица 1 – Угар ведущего элемента при раскислении стали в ковше

Ведущий элемент ферросплавов	Угар* элемента ферросплавов при содержании углерода в металле на выпуске, %		
	менее 0,10	0,10-0,25	более 0,25
Марганец	25-35	20-30	15-20
Кремний	30-40	25-35	20-25
Алюминий	100		
* количество элемента-раскислителя (%), окислившегося в процессе введения в металл в результате взаимодействия с кислородом металла, шлака и атмосферы.			

Кроме указанных элементов, для раскисления стали используются V, Ti, Zr, Nb, а также щелочноземельные (Ca, Mg, Ba) и редкоземельные (Ce, La, Nd,

Pr) металлы и их сплавы с кремнием и алюминием. Однако усложнение и удорожание раскисления стали применением дорогостоящих материалов оправдано только при производстве высококачественных легированных сталей (и сталей специального назначения).

Глубинное раскисление получило наиболее широкое распространение в промышленной металлургии по следующим причинам:

- технологическая простота реализации;
- небольшая продолжительность раскисления (5-10 минут), что позволяет совмещать эту операцию с выпуском металла в ковш.

Основным недостатком глубинного способа раскисления является образование в объеме металла мелкодисперсных оксидных неметаллических включений, не все из которых успевают всплыть из металла в шлак за время ковшевой обработки.

Снижения количества продуктов раскисления (неметаллических включений) в металле добиваются за счет организации перемешивания металла (продувкой инертным газом), а также изменением свойств оксидных включений, которые должны хорошо смачиваться шлаком и плохо металлом, а также находится в размягченном или жидком виде, что ускоряет процесс их укрупнения за счет слипания (коагуляции) и слияния (коалесценции) друг с другом, приводя к быстрому всплыванию в шлак.

Очень часто с целью получения в металле легкоплавких и хорошо всплывающих оксидных соединений применяют так называемые комплексные раскислители, представляющие собой сплав нескольких раскислителей: силикомарганец (сплав кремния и марганца), силикокальций (сплав кремния и кальция), сплав АМС (сплав алюминия, марганца и кремния), сплав КМК (сплав кремния, марганца и кальция) и др.

Диффузионное раскисление стали заключается в удалении из металла кислорода путем его естественной диффузии в шлак, обладающий минимальной окисленностью (характеризуется концентрацией оксидов железа). Минимально возможное остаточное содержание кислорода после диффузионного раскисления можно определить по равновесию реакции распределения кислорода между металлом и шлаком $[O] + Fe = (FeO)$.

Таким образом, при диффузионном способе раскисления продукты раскисления (неметаллические включения) не остаются в металле, что является основным преимуществом данного способа перед глубинным.

Для успешного проведения диффузионного раскисления необходимо выполнение следующих условий:

- наличие легкоплавкого жидкоподвижного шлака с минимальным содержанием оксидов железа;

– большая поверхность взаимодействия металла со шлаком, облегчающая диффузионные процессы;

Главным же недостатком диффузионного раскисления является большая продолжительность процесса, обусловленная низкой скоростью диффузии кислорода в металле и шлаке. Поэтому в чистом виде диффузионное раскисление металла не используют. Этот вид раскисления естественным образом реализуется при проведении восстановительного периода плавки в дуговых электроплавильных печах. Однако вследствие значительной продолжительности и больших расходов раскислителей (шлака) восстановительный период плавки в дуговых печах проводится только при производстве высококачественных легированных сталей из легированного металлолома, что позволяет минимизировать потери легирующих элементов со шлаком.

Эффект от диффузионного раскисления используется при ковшевой обработке металла высокоосновными восстановительными шлаками, применяемыми при ковшевой десульфурации стали. При таком варианте обработки, одновременно с удалением серы, происходит дополнительное раскисление металла, что повышает качество стали и является экономически оправданным.

Вакуум-углеродное раскисление стали заключается в удалении кислорода в результате смещения равновесия реакции $[C] + [O] = \{CO\}$ в сторону образования CO путем снижения парциального давления CO в газовой фазе.

Понижение парциального давления CO в газовой фазе достигается обработкой стали в вакууме или продувкой металла нейтральным газом, в котором парциальное давление CO близко к нулю («химический вакуум»). Главным преимуществом вакуумно-углеродного раскисления является то, что газообразные продукты реакции не растворяются в металле и полностью удаляются из него.

Теоретически, исходя из равновесия реакции $[C] + [O] = \{CO\}$, снижение давления над металлом до 100 Па (0,001 атм) при температуре 1600 °С и содержании углерода 0,2 %, обеспечивает удаление кислорода до 0,1 ppm. Однако на практике, вследствие кинетических ограничений (наличие шлака, низкая концентрация кислорода, протекание других процессов), термодинамическое равновесие не достигается. Поэтому, в промышленных условиях при уровне вакуума 100-200 Па, остаточное содержание кислорода в стали с содержанием углерода 0,2 % составляет 0,002-0,004 %, что выше раскислительной способности кремния, но меньше, чем у алюминия.

Существенным недостатком этого способа раскисления является необходимость сложного и дорогостоящего оборудования. Несмотря на это, вакуумная обработка стали находит все более широкое применение при производстве высококачественных сталей. Это связано с тем, что вакуумная обработка, помимо углеродного раскисления, способствует протеканию других процессов,

обеспечивающих повышение качества стали:

- удаление из металла растворенных газов – азота, и особенно, водорода;
- разрушения оксидных неметаллических включений в стали по реакциям типа $MeO + [C] = \{CO\} + [Me]$, равновесие которых сдвигается вправо при понижении давления. Практически удается частично разрушить только жидкие включения оксидов железа и марганца, а более прочные и тугоплавкие соединения (оксиды кремния, алюминия и др.) при такой обработке не удаляются.

Таким образом, вакуум-углеродное раскисление, как самостоятельная операция, применяется для обработки нераскисленного металла при производстве стали, свободной от крупных оксидных включений и их локальных скоплений. А при вакуумной обработке стали, предварительно раскисленной глубинным способом, решаются, в первую очередь, задачи дегазации и удаления эндогенных неметаллических включений.

1.3 Дегазация стали

Водород в стали и его удаление.

Растворимость водорода в железе скачкообразно повышается при его расплавлении и увеличивается по мере роста температуры жидкого металла, поэтому в ходе высокотемпературных сталеплавильных процессов обеспечиваются условия для насыщения металла водородом, источниками которого являются:

- передельный чугуны, содержащий 4-12 ppm (0,0004-0,0012 %) водорода;
- металлолом, особенно легированный титаном, ванадием, ниобием и другими гидридообразующими элементами (до 8-10 ppm). Дополнительным источником водорода, поступающего с ломом, является гидратная влага (особенно в ржавом ломе);
- гидратная влага, поступающая с добавочными материалами и флюсами;
- водород и водяные пары печного пространства, поступающие от сжигания углеводородного топлива или из атмосферы;
- раскислители и легирующие (например, содержание водорода в ферромарганце составляет 20-40 ppm, а в ферросилиции 10-15 ppm). Поэтому перед использованием их необходимо обязательно просушивать и прокалывать.

Водород из указанных источников может переходить в металл непосредственно (из металлошихты и раскислителей) или посредством газовой фазы по реакциям:

$$1. \{H_2\} = 2[H] \quad [H] = \sqrt{K_1 \cdot P_{\{H_2\}}}$$

$$2. \{H_2O\} = 2[H] + [O] \quad [H] = \sqrt{K_2 \cdot P_{\{H_2O\}} / [O]}$$

Из выражений для констант равновесия этих реакций следует, что содер-

жание водорода в металле увеличивается пропорционально корню квадратному из парциального давления водорода (или водяного пара) в газовой фазе.

Таким образом, несмотря на наличие шлака, в процессе выплавки стали невозможно исключить насыщения жидкого металла водородом, содержание которого к концу плавки может достигать 8-12 ppm (обычно 6-8 ppm). Однако в процессе разливки и затвердевания стали, растворимость водорода резко уменьшается – линейно при охлаждении в жидком состоянии и скачкообразно при переходе из жидкого состояния в твердое. Это ведет к интенсивному выделению из металла водорода в газовую фазу, что вызывает нарушение целостности металла и образование различных дефектов в литой стали: газовые пузыри, трещины (разрывы), флокены (особой формы газовые пузыри) и др. Оставшийся в твердом растворе водород искажает кристаллическую решетку металла, в результате чего его хрупкость возрастает, а пластичность уменьшается.

Таким образом, избыточное содержание водорода в стали оказывает отрицательное воздействие на ее свойства, устранение которого возможно при снижении концентрации водорода до 1,0-1,5 ppm или связывании водорода в прочные соединения – гидриды.

Для снижения содержания водорода в металле и ослабления его вредного влияния на качество стали применяют следующие методы:

1. Организация постоянного кипения ванны по ходу плавки, обеспечивающая удаление водорода в пузырьках CO, образующихся при окислении углерода. Удаление водорода из металла происходит по реакции $[H] = \frac{1}{2}\{H_2\}$ вследствие того, что парциальное давление водорода в пузырьках CO равно нулю, что смещает равновесие реакции вправо. Однако вследствие протекания обратного процесса, кипение ванны не обеспечивает решение вопроса рафинирования металла от водорода.

2. Продувка инертным газом (обычно используют аргон, реже – азот) обеспечивает удаление водорода во всплывающих пузырьках, давление водорода в которых близко к нулю. Удаление водорода до 2 ppm возможно только при расходе газа более 2 м³/т. На практике продувку металла аргоном проводят в ковше после выпуска плавки (для усреднения химического состава и температуры металла, удаления НВ) с удельным расходом 0,1-0,2 м³/т, при котором степень удаления водорода не превышает 20-30 %.

3. Обработка металла вакуумом, в ходе которой вследствие снижения давления водорода в газовой фазе ускоряется реакция перехода водорода из металла в газовую фазу: $[H] = \frac{1}{2}\{H_2\}$. Эффективность способа, определяемая глубиной вакуума и продолжительностью обработки, достигает 70-80 % и более.

4. Выдержка закристаллизовавшегося металла при повышенных температурах (400-700 °С) обеспечивает диффузию избыточного водорода в атомарном состоянии через кристаллическую решетку железа с последующим

удалением в атмосферу. Повышенные температуры увеличивают скорость диффузии, однако эффективность способа определяется массой слитка и длительностью обработки. Этот способ применяют для окончательного удаления водорода (до 2-3 ppm) из заготовок флокеночувствительных марок сталей, для чего их помещают в обогреваемые колодцы.

5. Добавка гидридообразующих элементов (Ce, La, Ti, Ta, V, Nb и др.), повышающих растворимость водорода в стали за счет образования прочных соединений – гидридов, выделение водорода из которых в самостоятельную фазу при охлаждении не происходит.

Несмотря на большое количество методов борьбы с водородом в стали, необходимо использовать все способы, чтобы исключить попадание водорода в металл в процессе плавки (минимальная влажность воздуха, кислорода, топлива, минимум влаги в добавочных материалах и т. п.).

Азот в стали и его удаление.

В обычных условиях плавки невозможно получить сталь, не содержащую азот, что объясняется наличием азота в шихтовых материалах, и атмосфере рабочего пространства, а также увеличением растворимости азота в жидком железе с повышением температуры.

Источниками поступления азота в металл в процессе выплавки, ковшевой обработки и разливки стали являются:

- передельный чугуны, содержащий 0,003-0,006 % азота;
- металлический лом, в котором в зависимости от технологии выплавки и химического состава содержание азота обычно изменяется от 0,002 до 0,012 %, а в легированных азотом сталях достигает 0,5 % и более;
- воздух, используемый для сжигания топлива, а также поступающий в печное пространство из атмосферы. содержит 79 % азота;
- кислород, применяемый для продувки ванны, содержит от 0,5 (технический кислород) до 5 % (технологический кислород) азота.

Растворение азота в металле, как и для водорода, подчиняется общей закономерности – закону квадратного корня (закон Сиверта), согласно которому равновесное содержание азота в жидкой стали $[N]$ пропорционально корню квадратному из парциального давления азота ($P_{\{N_2\}}$) в газовой фазе. Математически эта зависимость выводится из константы равновесия реакции $\{N_2\} = 2[N]$:

$$[N] = \sqrt{K \cdot P_{\{N_2\}}}.$$

Несмотря на защитную роль шлака, концентрация азота в металле в конце плавки составляет от 0,002 до 0,012 %, что определяется особенностями технологии (обычно, в кислородно-конвертерной стали содержится 0,002-0,005 %N, в

электростали – 0,006-0,012 %N). В процессе выпуска, раскисления-легирувания и разливки, концентрация азота может повышаться на 0,001-0,003 %.

Указанные концентрации меньше растворимости азота в жидком железе, но существенно выше растворимости азота α -Fe в области нормальных температур, которая составляет менее 0,0015 %. Избыточный азот может находиться в металле в растворенном виде (в виде пересыщенного твердого раствора) или выделяться в отдельную фазу – нитриды. Выпадение азота из твердого раствора в виде нитридов (нитриды железа и др.), называемое старением металла, ведет к возникновению напряженности в структуре металла, повышению его твердости и хрупкости в процессе эксплуатации изделия. Вредное влияние азота особенно заметно для малоуглеродистых сталей, которые должны иметь высокие пластические свойства. Особенно вредно ухудшение свойств металла с повышенным содержанием азота при эксплуатации в условиях низких температур.

Таким образом, повышенное содержание азота на свойства стали в большинстве случаев оказывает отрицательное влияние, понижая ударную вязкость стали и ухудшая ее пластичность.

Для снижения содержания азота в металле и ослабления его вредного влияния на качество стали применяют следующие методы:

1. Использование чистых по азоту материалов, особенно, кислородного дутья, используемого для окислительного рафинирования. Предпочтительно применение технически чистого кислорода. содержание азота в котором не превышает 0,5 %;

2. Организация постоянного кипения ванны по ходу плавки в результате окисления углерода. Выделяющийся монооксид углерода экранирует металл от азотсодержащей атмосферы, а также возможно удаление азота в всплывающих пузырях CO, давление азота в которых минимально. Однако вследствие эндотермичности, реакция $[N] = \frac{1}{2}\{N_2\}$ получает слабое развитие.

3. Предохранение металла от соприкосновения с азотсодержащей атмосферой в зоне повышенных температур, достигаемое путем создания защитного слоя вспененного шлака или охлаждения высокотемпературных зон присадками твердых окислителей. Предохранение металла от контакта с азотсодержащей атмосферой при выпуске, ковшевой обработке и разливки стали, кроме шлака, обеспечивается созданием инертной атмосферы – выпуск и разливка могут производиться в защитной оболочке из аргона.

4. Продувка металла аргоном, кроме удаления водорода, способствует некоторому удалению азота. Однако вследствие низкой скорости диффузии азота, его удаление при продувке металла минимально. Аргон играет более существенную роль при его использовании для создания защитной оболочки при выпуске или разливке металла.

5. Обработка металла вакуумом, в ходе которой, вследствие снижения дав-

ления азота в газовой фазе облегчается протекание реакции $[N] = \frac{1}{2}\{N_2\}$. Однако, из-за низких скоростей диффузии азота в металле, его удаление при вакуумировании в промышленных условиях составляет не более 10-20 %.

6. Введение в жидкую сталь нитридообразующих элементов (Si, Al, V, Ti, Zr и др.), обеспечивающих связывание избыточного азота в прочные тугоплавкие нитриды, которые выделяются из жидкого металла в виде мелких включений и служат центрами кристаллизации железа. Это не только предотвращает старение стали, но и обеспечивает измельчение структуры слитка/заготовки и повышение прочностных свойств стали.

1.4 Неметаллические включения в стали и их модифицирование

Неметаллические включения – это химические соединения металлов (железа, кремния, марганца, алюминия, церия и др.) с неметаллами (серой, кислородом, азотом, фосфором, углеродом), находящиеся в стали в виде отдельных фаз (оксидов, сульфидов, нитридов, фосфидов, карбидов и более сложных соединений).

Появление неметаллических включений в жидкой стали обусловлено технологическими особенностями ее производства:

- фактическое содержание в жидком металле кислорода, серы, фосфора, азота и других вредных примесей в конце окислительного рафинирования намного выше их растворимости в твердой стали, что ведет к их обособлению в самостоятельную фазу в виде неметаллических включений (кроме CO);

- наличие неметаллических включений в металлошихте, а также использование добавочных материалов, преимущественно состоящих из оксидов;

- выплавка металла происходит в агрегатах (конвертер, печь, ковш и др.), футерованных изнутри огнеупорными материалами, неизбежное разрушение которых ведет к появлению неметаллических включений в металле;

- все технологические процессы производства стали проводятся под слоем шлака, частицы которого также могут попадать в металл и участвовать в образовании неметаллических включений;

- продуктами глубинного раскисления являются оксиды, являющиеся неметаллическими включениями.

Таким образом, в любой твердой стали неизбежно содержание различных неметаллических включений, которые ухудшают ее механические (прочность, пластичность, износостойкость) и многие другие свойства (электротехнические, антикоррозионные и др.). Ухудшение свойств стали связано с нарушением сплошности металла, а также тем, что включения по сравнению с металлом имеют разный коэффициент расширения и неодинаковую деформируемость. Степень влияния включений на свойства стали определяется их количеством,

составом, размерами и характером расположения в готовом изделии.

Неметаллические включения принято подразделять на эндогенные (от греч. *endo* – внутри и *genos* – род, рождение) и экзогенные (от греч. *exo* – вне и *genos* – род, рождение).

При нормальном проведении процессов выплавки, ковшевой обработки и разливки, количество экзогенных включений, остающихся в структуре твердой стали, не превышает 5-10 % от общего количества включений. Таким образом, основное количество наблюдаемых в твердой стали неметаллических включений представляет собой эндогенные включения – включения внутреннего происхождения.

Эндогенные включения являются продуктами взаимодействия кислорода, серы, фосфора, углерода и азота с другими компонентами расплава. В зависимости от химического состава их принято делить на следующие группы:

- сульфидные (FeS , MnS и т. п.);
- оксидные (FeO , MnO , SiO_2 , Al_2O_3 и т. п.);
- нитридные (Si_3N , AlN , VN , TiN и т. п.);
- фосфидные (Fe_2P , Mn_5P_2);
- карбидные (карбиды титана, ниобия и др. сильных карбидообразующих).

На практике включения представляют собой сложные химические соединения: силикаты ($n\text{FeO} \cdot m\text{MnO} \cdot p\text{SiO}_2$), алюмосиликаты ($n\text{MnO} \cdot m\text{SiO}_2 \cdot p\text{Al}_2\text{O}_3$), шпинели ($\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), оксисульфиды, карбонитриды и т. д.

Для подавляющего большинства выплавляемых в настоящее время сталей, относящихся к высококачественным углеродистым, основную массу включений (70-85 %) составляют оксидные, что связано с высокой окисленностью металла в конце окислительного рафинирования.

Количество эндогенных неметаллических включений в обычной стали редко превышает 0,01-0,02 %, а в качественной оно существенно ниже. Однако в связи с тем, что размеры включений очень малы (от 10^{-5} до 10^{-2} мм), число включений в металле огромно, поэтому их влияние на механические и другие свойства стали может быть значительным. Это влияние зависит как от химического состава и свойств включений, так и от их формы и характера расположения:

- включения, расположенные по границам зерен в виде тонких пленок, образуются при кристаллизации, если имеют температуру плавления ниже температуры затвердевания стали и хорошо смачивают металл. Такими свойствами обладают оксиды и сульфиды железа, а также их соединения – оксисульфиды. Такие включения ухудшают межзеренную связь и прочностные свойства металла особенно при высоких температурах (красноломкость), когда включения раз-

мягчаются;

- крупные остроугольные (кристаллические) включения также представляют большую опасность, так как они служат местом концентрации напряжений и начала разрушения изделия. Такие включения обычно являются продуктами раскисления-легирования, имеющими высокую температуру плавления (например, нитриды титана, кремнезем и др.), превышающую температуру затвердевания стали;

- включения округлой (сферической) формы, имеющие относительно крупные размеры, формируются в процессе кристаллизации, если обладают низкой температурой плавления (ниже температуры затвердевания стали) и плохо смачивают твердое железо. Такие включения (главным образом, силикаты) оказывают минимальное воздействие на свойства металла;

- мелкие тугоплавкие включения, расположенные равномерно по всему объему металла, приносят наименьший вред, а в ряде случаев являются полезными, поскольку, являясь центрами кристаллизации, способствуют измельчению структуры литого металла. Наилучшие результаты по измельчению первичного зерна достигаются в том случае, если центрами кристаллизации являются нитриды и карбонитриды.

Таким образом, наименее вредны для свойств стали глобулярные, мелкие и равномерно расположенные по объему металла включения.

Поскольку получение абсолютно чистой от неметаллических включений стали невозможно, то для уменьшения их вредного воздействия на свойства металла необходимо:

- добиваться снижения содержания включений в затвердевшей стали;
- обеспечивать формирование включений мелких по размерам, расположенных равномерно в объеме металла и имеющих сферическую форму.

Всплыванию неметаллических включений в шлак способствуют следующие условия:

- большие размеры и низкая плотность включений (от 2 до 6 т/м³), обеспечивающие их выталкивание из металла под действием архимедовой силы;

- высокая интенсивность перемешивания металла (например, продувкой инертным газом), ускоряющая всплывание;

- низкая вязкость металла, определяемая, главным образом, его температурой;

- плохая смачиваемость включений металлом и хорошая смачиваемость включений шлаком, что облегчает поглощение (ассимиляцию) включений в объем шлака;

- низкая температура плавления, обеспечивающая присутствие оксидных включений в размягченном или жидком виде, что ускоряет процесс их укруп-

нения за счет слипания (коагуляции) и слияния (коалесценции) друг с другом, приводя к быстрому всплыванию в шлак.

Влияние некоторых факторов на линейную скорость всплывания включений (V , м/с) можно приближенно оценить по формуле Стокса:

$$V = \frac{2}{9} g \cdot r^2 \cdot \left[\frac{\rho_{\text{мет}} - \rho_{\text{НВ}}}{\eta} \right],$$

где g – ускорение свободного падения, $9,81 \text{ м/с}^2$;

r – радиус включения, см;

ρ – плотность металла и включения, кг/м^3 ;

η – вязкость жидкой стали, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Однако даже полное удаление неметаллических включений из жидкой стали не обеспечивает получение чистой от включений стали в твердом состоянии, поскольку выделение включений происходит в процессе кристаллизации и при фазовых превращениях. Поэтому, для повышения качества стали, необходимо обеспечить такую форму, размеры и расположение включений, при которых их вредное влияние на свойства металла было бы минимальным. Минимальное отрицательное влияние на свойства металла оказывают мелкие включения, равномерно распределенные в объеме металла, особенно округлой (глобулярной) формы.

Получение мелких твердых включений, равномерно распределенных по объему металла, возможно введением в металл сильных раскислителей, образующих тугоплавкие включения, являющиеся центрами кристаллизации при затвердевании стали. Получения мелких включений глобулярной формы обеспечивается тогда, когда температура их плавления значительно ниже температуры кристаллизации металла и включения плохо смачиваются металлом (например, сульфиды и алюминаты кальция, образующиеся при раскислении металла кальцием). Воздействие на состав и форму неметаллических включений с целью минимизации их вредного влияния называют *модифицированием* (от лат. *modificare* – видоизменять, менять форму). Для модифицирования стали (неметаллических включений в стали) используются Al, Ti, W, ШЗМ (Ca, Ba, Sr и др.) и РЗМ (La, Ce, Pr, Nd, Y и др.).

1.5 Легирование стали

Легирование стали заключается во введении в металл элементов (легирующих) в количествах, превышающих их расход на раскисление стали (связывание кислорода), с целью получения заданного химического состава и свойств (в изделии после термомеханической обработки). Соответственно, легирующие

элементы – это полезные примеси стали, которые вводят в металл для получения требуемых физико-химических или механических свойств. Поэтому легирование является не обязательной операцией и применяется при выплавке специальных (легированных) марок сталей.

Легированные элементы принято подразделять на обычные легированные и микролегированные элементы.

Обычные легированные элементы – это элементы, которые вводят в металл в значительных количествах, более 0,10 %. Они в основном вызывают изменение кристаллической решетки железа, приводя к повышению прочностных и других свойств железа (матрицы). В качестве обычных легированных элементов используют С, Мn, Si, Cr, Ni, V, Мо, W, Со, Ti, Al, Zr, Nb, Cu и др. Влияние некоторых легированных на свойства стали показано в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние химических элементов на свойства (характеристики) стали

Характеристика	С	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	V	Mo	Ti
Предел прочности	↑↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Предел текучести	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Отн. удлинение	↓↓	↓	↓	-	-	-	↓	↓	-
Твердость	↑↑	↑	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑
Ударная вязкость	↓	↓↓	↓	↑	↑	-	-	-	↓
Усталостная прочность	↑	-	-	-	-	-	↑↑	↑↑	-
Свариваемость	↓	↓	-	-	-	↓	↑	↑	↑
Коррозионностойкость	-	↓	↑	↑	↑	↑↑	↑	↑	-
Хладноломкость	-	-	-	↓	↓	↓	-	-	-
Красноломкость	↑	↑	-	-	-	-	-	↓	-

Примечание: стрелками показано влияние (положительное или отрицательное) элементов на свойства стали; пробел означает отсутствие влияния.

Легирование стали обычно проводят глубинным способом и совмещают с раскислением (особенно, если металл легируют марганцем, кремнием или алюминием). При этом, легированные элементы, имеющие низкое химическое сродство к кислороду (Ni, Со, Мо, Cu) можно вводить в металл в начале плавки вместе с шихтой.

Если остаточная концентрация легирующего элемента в стали (кроме марганца и кремния) составляет менее 0,1 %, то такое легирование принято называть *микролегированием*. В понятие «микролегирование» часто включают процессы модифицирования, поскольку эти операции заключаются в введении в расплав небольших количеств активных элементов. Однако микролегирование и модифицирование отличаются механизмом влияния на структуру и свойства стали и сплавов (см. таблицу 3).

Таблица 3 – Сопоставление микролегирования и модифицирования

Процесс	Количество	Механизм действия
Микролеги- рование	до 0,1 %	Проявляется в твердом состоянии: - влияет на строение и энергетическое состояние границ зерен; - реализуются два механизма упрочнения: твердорастворное и дисперсионное
Модифици- рование	до 0,1 %	Проявляется в процессе кристаллизации, способствует: - измельчению структуры; - изменению геометрической формы, размеров и распределения неметаллических включений, - изменению формы эвтектических выделений

При *модифицировании* вводимые легирующие элементы воздействуют на морфологию неметаллических включений, первичных кристаллов и степень дисперсности первичных кристаллических фаз, т.е. их роль проявляется *в процессе кристаллизации*.

При *микролегировании* роль легирующих элементов проявляется, главным образом, *в твердом состоянии* в результате образования растворов внедрения или замещения; воздействия на степень дисперсности вторичных зерен, размер, форму и распределение неметаллических включений, строение границ зерен.

В качестве микролегирующих и модифицирующих элементов используют щелочноземельные металлы (Ca, Mg, Ba, Sr), редкоземельные металлы (La, Ce и др.), Nb, Ti, Zr, Al, B, V и др. Кроме легирующего воздействия, они оказывают и модифицирующее действие благодаря высокой химической активности, то есть способности образовать прочные химические соединения с некоторыми компонентами стали (Fe, S, O, N и др.). Эти соединения позволяют обеспечить желаемое кристаллическое строение стали и повлиять на природу (форму, размеры и т. д.) неметаллических включений.

1.6 Продувка металла инертным газом

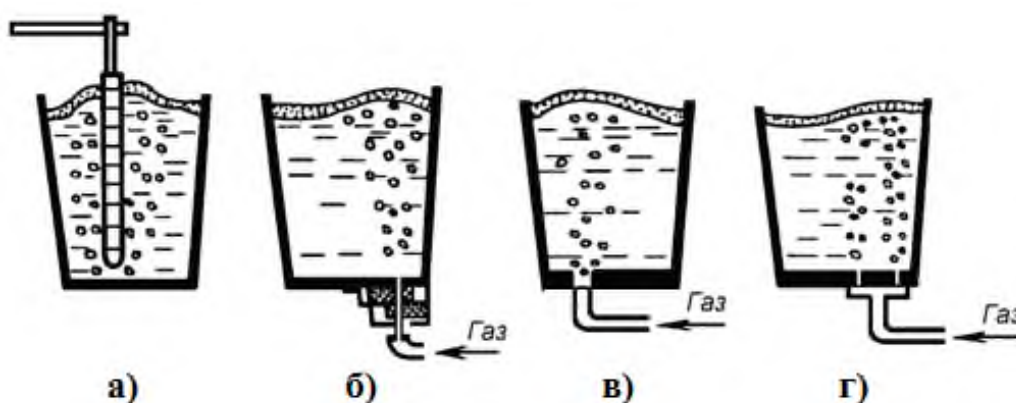
Продувка металла в ковше инертным газом (аргоном, и реже, азотом) является обязательным элементом современной технологии ковшевой обработки стали и позволяет решать следующие задачи:

- усреднение химического состава и температуры металла;
- корректировка температуры металла (охлаждение);
- ускорение расплавления и равномерное распределения в объеме ковша легирующих и раскислителей;
- удаление неметаллических включений, образующихся при глубинном раскислении;

- дегазация (снижение концентрации водорода и азота) металла;
- интенсификация процессов вакуумирования и десульфурации металла за счет лучшего перемешивания.

В зависимости от решаемых задач при использовании инертного газа выбирают тип и конструкцию продувочного устройства, режим продувки и величину расхода инертного газа. Наиболее простыми вариантами подачи инертного газа (без изменения конструкции футеровки ковша) является использование устройств типа футерованной фурмы («ложного» стопора), погружаемых в металл на 250-300 мм выше уровня днища ковша или подача газа через кислородную трубку, установленную в шиберном затворе стальной ковша (см. рисунок). Однако эти способы имеют ограниченную эффективность, поскольку не обеспечивают формирование мелких пузырей газа (менее 5 мм) и их равномерное распределение по объему металла. Поэтому в современном сталеплавильном производстве предпочитают применять более сложные, но и более эффективные способы подачи аргона в ковш (рисунок 1):

- через пористые пробки (блоки), устанавливаемые в днище ковша;
- через пористые швы в днище ковша.



- а – через погружаемую фурму; б – через шиберный затвор;
в – через пористый блок; г – через пористые швы в днище

Рисунок 1 – Способы продувки металла в ковше

Эти варианты обеспечивают более равномерное распределение пузырьков аргона в объеме металла и возможность регулирования расхода газа в широком диапазоне при сохранении размеров пузырьков газа на оптимальном уровне – менее 5 мм. Стойкость пористых огнеупорных блоков (из муллитового, корундового, магнезитового или цирконо-силикатного огнеупорного материала) достигает 3-5 плавов (продувок), а днище из обычных огнеупоров с пористыми швами служит всю кампанию ковша и заменяется только при ремонте футеровки.

Кроме способа подвода инертного газа, на эффективность его использования влияет расход, определяемый продолжительностью и интенсивностью продувки.

Ускорение расплавления и равномерное распределение легирующих и раскислителей, выравнивание температуры и химического состава металла в объеме ковша обеспечивается при расходе инертного газа до $0,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ и продолжительности продувки 5-10 мин. При этом, для усреднения металла по составу и температуре достаточна продувка в течении 2-3 минут с расходом газа до $0,2 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Удаление из металла неметаллических включений (оксидные продукты раскисления) обеспечивается при расходе инертного газа $0,5-1,0 \text{ м}^3/\text{т}$ и продолжительности продувки не менее 10-15 мин. при обязательном присутствии на поверхности металла в ковше жидкоподвижного восстановительного покровного шлака.

Дегазация металла при продувке его в ковше аргоном возможна в процессе длительной продувки (20-30 мин) при расходе аргона $2-3 \text{ м}^3$ на 1 т стали. Однако даже при такой обработке не удастся понизить содержание водорода ниже 3 ppm, а содержание азота практически не снижается.

Продувку инертным газом применяют также при вакуумировании и десульфурации металла. Эффективность этих операций повышается в результате интенсификации перемешивания металла, а также увеличения поверхности контакта металла со шлаком (для десульфурации).

Стали, не содержащие нитридообразующих элементов (хром, титан, ванадий и др.) допускается продувать азотом, действие которого на металл аналогично аргону. При этом, при температуре обрабатываемого металла до $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ не происходит заметного растворения азота. Однако с повышением температуры металла и расхода азота вероятность его растворения в металле существенно повышается, что ограничивает его применение на практике.

Таким образом, в зависимости от решаемых при продувке инертным газом задач, расход газа может изменяться от $0,1$ до $3 \text{ м}^3/\text{т}$ стали (обычно $0,3-2,0 \text{ м}^3/\text{т}$) при давлении $0,2-0,5 \text{ МПа}$. При обычной технологии продувки с расходом газа до $2 \text{ м}^3/\text{т}$ охлаждающий эффект составляет $1,5-3,0 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ (без продувки скорость охлаждения $0,5-1,0 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$). Поэтому при продувке в течение 10-15 минут температура металла снижается на $20-30 \text{ }^\circ\text{C}$, что необходимо учитывать в технологии производства стали.

1.7 Удаление вредных примесей (сера и фосфор)

Общие закономерности десульфурации и дефосфорации

Исходя из термодинамических и кинетических закономерностей, основными условиями, необходимыми для успешного удаления серы и фосфора из металла в шлак, являются:

Для десульфурации	Для дефосфорации
наличие гомогенного жидкоподвижного высокоосновного (CaO/SiO ₂) шлака	
большая площадь контакта металла со шлаком	
низкая окисленность металла и шлака (минимум (FeO) и [O])	высокая окисленность металла и шлака (максимум (FeO) и [O])
высокая температур	умеренная температура
низкая концентрация серы в шлаке	низкая концентрация фосфора в шлаке

В целом в процессе окислительного рафинирования (в сталеплавильных агрегатах) складываются благоприятные условия для удаления фосфора, позволяющие выплавлять стальной полупродукт с содержанием фосфора на уровне 0,005-0,010 % в одношлаковом режиме при основности шлака на уровне 2,4-2,8 ед. и содержании фосфора в металлошихте не более 0,1 %. Поэтому, как правило, задача достижения заданного содержания фосфора в стали решается на стадии выплавки стального полупродукта.

Для удаления серы условия окислительного рафинирования неблагоприятны: в условиях одношлакового сталеплавильного процесса (при количестве образующегося шлака в пределах 10-15%) степень удаления серы составляет обычно не превышает 20-30 %. Таким образом, в ходе окислительного рафинирования при содержании серы в металлошихте на уровне 0,030% и более невозможно обеспечить удаление серы до уровня требований непрерывной разливки – 0,015 %. Поэтому окончательное удаление серы проводят в ковше, где можно создать более благоприятные для десульфурации условия.

Существует несколько вариантов ковшевой десульфурации металла:

- обработка в ковше синтетическими шлаками и шлакообразующими смесями;
- вдувание в металл порошкообразных материалов.

Обработка в ковше синтетическими шлаками и шлакообразующими смесями

Обработка металла шлаком способствует развитию процессов рафинирования металла от таких примесей как сера, фосфор и кислород.

На практике широкое распространение получил вариант обработки металла высокоосновными восстановительными шлаками, обеспечивающими рафинирование металла от серы и кислорода, а также поглощение неметаллических включений. Такие шлаки, полученные не в сталеплавильном агрегате, а в специальной шлакоплавильной печи или непосредственно в сталеразливочном ковше из смеси шлакообразующих материалов, принято называть синтетическими (от англ. *synthetic* – искусственный) шлаками.

На практике применяется два способа обработки металла в ковше шлаками:

- жидким синтетическим шлаком, заливаемым в сталеразливочный ковш перед выпуском плавки;
- твердыми шлакообразующими смесями, загружаемыми в ковш перед выпуском (в процессе выпуска или после него), в процессе которого происходит формирование жидкого шлака.

При использовании жидкого синтетического шлака, заливаемого в ковш перед выпуском, падающая струя металла хорошо перемешивает металл со шлаком, образуя шлако-металлическую эмульсию, в результате чего значительно увеличивается поверхность контакта «шлак-металл» и скорость протекания процессов рафинирования металла шлаком. В результате за время выпуска (5-10 мин) при расходе основного восстановительного шлака 3-5 кг/т и продувке аргоном в течение не менее 5 минут обеспечивается удаление серы на 50-70 %. Процесс обработки сопровождается снижением окисленности металла (в 1,5-2,0 раза) и содержания в нем оксидных включений (в 2 и более раза), смазываемых синтетическим шлаком (или взаимодействующих с его компонентами).

Состав жидких синтетических шлаков должен обеспечивать высокую сульфидную емкость (высокая активность CaO) при минимальной окисленности, температуре плавления (до 1400 °C) и вязкости. Таким требованиям удовлетворяют известково-глиноземистые шлаки следующего состава, % масс.: 50-55 CaO, 37-43 Al₂O₃, <5 SiO₂, < 5 MgO, < 1,0 FeO. При отсутствии качественного глинозема с низким содержанием SiO₂ в состав шлака вводят магнезию (до 10 %), образующую силикаты магния и уменьшающую вредное воздействие кремнезема, снижающего активность CaO. При этом эффективная десульфурация обеспечивается при использовании известково-шамотных шлаков следующего состава, % масс.: 48-56 CaO, 8-10 MgO, 18-22 SiO₂, 12-16 Al₂O₃, 0,5-1,0 CaF₂, < 1,0 FeO.

Несмотря на высокую эффективность и небольшую продолжительность, обработка металла жидким синтетическим шлаком связана с рядом ограничений:

- необходим специализированный агрегат для выплавки шлака;
- необходимо минимизировать попадание в ковш печного шлака, снижающего рафинирующую способность синтетического шлака.

Более простым вариантом обработки металла в ковше синтетическим шлаком является использование легкоплавких твердых шлаковых смесей (ТШС), подаваемых на дно ковша перед выпуском, или во время выпуска на струю металла. В состав шлакообразующих смесей обычно входит известь (70-80 %), плавиковый шпат (10-20 %) и глиноземсодержащий материал (шамот, 10-20 %).

При этом жидкий шлак образуется в ковше за счет тепла металла. Обработка металла такой смесью с расходом 3-6 кг/т обеспечивает удаление серы на 30-50 %. При расходе ТШС до 10-15 кг/т и продувке аргоном (для повышение площади взаимодействия шлака с металлом) обеспечивается степень удаления серы до 90-95 %. Обязательными условиями эффективной работы шлака являются

- продувка инертным газом с удельным расходом от 0,2 до 0,5 м³/т;
- низкая окисленность, которая обеспечивается раскислением шлака алюминием, карбидом кальция(CaC₂) или кремния (SiC).
- низкая температура плавления и вязкость, достигаемая добавками шпата, а также оптимальным составом, % масс.: 50-55 CaO, 8-10 MgO, 15-18 SiO₂, 15-18 Al₂O₃, 0,5-1,0 CaF₂, < 1,0 FeO

Недостатком этого варианта обработки также является снижение температуры металла на 10-15 °С. Однако благодаря простоте и отсутствию серьезных организационных трудностей такой способ внепечного рафинирования нашел широкое применение в сталеплавильных цехах.

Десульфурация при вдувании в металл порошкообразных материалов

При вдувании порошкообразного материала в металл обеспечиваются наиболее благоприятные кинетические условия для взаимодействия вдуваемого вещества с расплавом за счет значительного увеличения поверхности контакта «металл-реагент» и времени пребывания реагента в расплаве.

В качестве транспортирующего газа для вдувания порошкообразных материалов при десульфурации обычно используют аргон. При этом применяется два варианта составов порошкообразных материалов:

- 1) вдуванием в металл порошка извести или порошков извести (75-80 %) и плавикового шпата (20-25 %);
- 2) вдуванием в металл порошка кальцийсодержащих сплавов (силикокальций, карбид кальция и т.д.) или смеси порошков кальцийсодержащего сплава и магния.

Вдувание извести с плавиковым шпатом ведет к образованию в объеме металла мелких капель шлака с низкой температурой плавления (до 1200 °С) и высокой сульфидной емкостью, что ускоряет протекание реакции десульфурации $[FeS] + (CaO) = (CaS) + (FeO)$. Удаление серы при этом ускоряется благодаря большой удельной поверхности частиц извести с металлом, а также в результате перемешивания металла с поверхностным шлаком всплывающими пузырями транспортирующего газа. В зависимости от условий обработки и расхода реагентов (не более 10 кг/т) степень десульфурации может изменяться от 60 до 90 %, при глубине удаления серы до 0,002 %.

При вдувании в жидкий металл порошкообразных сплавов кальция или магния, растворенная в железе сера, реагирует с кальцием и магнием по реак-

циям: $\text{Ca} + [\text{S}] = (\text{CaS})$, $\text{Mg} + [\text{S}] = (\text{MgS})$. Образующиеся сульфиды имеют низкую плотность и поэтому всплывают на поверхность металла в ковше, где переходят в покровный шлак, чему способствуют всплывающие пузыри газаносителя.

Из-за низких температур кипения (температуры кипения магния и кальция составляют 1107 и 1483 °С, соответственно) непосредственно на десульфурацию расходуется не более 50 % вводимых кальция и магния). Для минимизации их расхода необходимо вводить реагенты в глубоко раскисленный металл на максимально возможную глубину. Кроме эффективной десульфурации, плюсом данного способа обработки является то, что сульфиды кальция, частично остающиеся в металле, благодаря высокой температуре плавления и плохой смачиваемости металлом, присутствуют в стали в виде глобулярных включений, равномерно распределенных по объему металла, что существенно снижает вредное влияние серы. При обработке металла сплавами кальция также меняется преобладающий тип оксидных включений в готовой стали, раскисленной алюминием: хрупкие остроугольные включения на основе глинозема, заменяются на округлые алюминаты кальция (типа $n\text{CaO} \cdot m\text{Al}_2\text{O}_3$). Такие включения не крошатся при прокатке, что приводит к заметному улучшению служебных свойств стали.

Расход порошкообразных сплавов кальция или магния при их вдувании в металл обычно не превышает 1,5 кг/т (обычно 0,7-1,0 кг/т) при расходе аргона до 0,1 м³/(т·мин) и снижении температуры металла до 15-20 °С.

Для улучшения усвоения щелочноземельных металлов применяют их введение в металл в **виде порошковой проволоки** посредством трайб-аппарата (специальный аппарат, с помощью которого порошковую проволоку вводят в расплав металла). Порошковая проволока представляет собой стальную оболочку диаметром 8-16 мм, внутри которой находится спрессованный порошкообразный реагент. Процессы рафинирования, протекающие при такой обработке стали, по своей сути не отличаются от процессов, протекающих при вдувании порошка кальцийсодержащих сплавов.

1.8 Вакуумная обработка стали

Сущность вакуумной обработки стали.

Вакуумирование стали позволяет решать следующие задачи:

– удаление кислорода и оксидных неметаллических включений (вакуумно-углеродное раскисление) в результате смещения равновесия реакций с участием углерода и кислорода ($[\text{C}] + [\text{O}] = \{\text{CO}\}$, $(\text{MeO}) + [\text{C}] = [\text{Me}] + \{\text{CO}\}$) вправо. Степень удаления кислорода и оксидных включений определяется глубиной вакуума и длительностью обработки. При вакуумировании в промыш-

ленных условиях возможно снижение концентрации растворенного кислорода до пределов растворимости в твердом металле, а также полное разложение таких включений, как MnO или Cr_2O_3 ;

- глубокое обезуглероживание металла (вакуум-кислородное обезуглероживание) для получения остаточного содержания углерода на уровне менее 0,02 %;

- удаление из металла водорода благодаря смещению вправо равновесия реакций $2[H] \leftrightarrow \{H_2\}$. Кроме глубины вакуума и продолжительности обработки, удалению водорода способствует увеличение площади поверхности раздела «металл-газ» в результате перемешивания металла при продувке инертным газом или всплывания пузырьков CO при углеродном раскислении. При благоприятных условиях (вакуум до 50 Па) степень удаления водорода достигает 80 % (и более), а содержание водорода снижается до пределов его растворимости в твердом железе – 1-2 ppm;

- удаление из металла азота в результате активизации реакции $2[N] \leftrightarrow \{N_2\}$. Однако из-за низкой подвижности (скорости диффузии) азота в жидком металле степень его удаления при вакуумировании не превышает 15-30 %. Удалению азота препятствует также присутствие в металле сильных нитридообразующих элементов (Cr , Nb , V , Ti и др.), а также поверхностно-активных примесей (кислород, сера и др.), вытесняющих азот с поверхности раздела «металл-газ» в объем жидкого металла. Поэтому для удаления азота целесообразно проводить обработку раскисленного металла с минимальным содержанием серы и при активном перемешивании расплава инертным газом (аргоном);

- всплывание и удаление неметаллических включений в результате интенсивного перемешивания металла пузырями, выделяющихся при вакуумировании газов;

- выравнивание химического состава и температуры металла в результате перемешивания расплава при всплывании газообразных продуктов раскисления.

Таким образом, при вакуумной обработке снижается содержание растворенных в металле кислорода, водорода, оксидных неметаллических включений, металл становится более однородным по составу и температуре, а также появляется возможность глубокого обезуглероживания.

Способы вакуумной обработки стали/

В настоящее время в промышленных условиях применяют следующие основные способы вакуумной обработки стали (рисунок 2):

- вакуумирование металла в ковше, помещенном в вакуумную камеру;
- вакуумирование металла отдельными частями (порциями) – порцион-

ное и циркуляционное вакуумирование;

– вакуумирование струи металла при технологических переливах (при переливе из ковша в ковш, при разливке в изложницы, на выпуске из сталеплавильного агрегата, при переливе из сталеразливочного ковша в промежуточный ковш МНЛЗ и др.);

– вакуум-кислородное обезуглероживание металла, при котором металл, находящийся под действием вакуума, продувают кислородом.

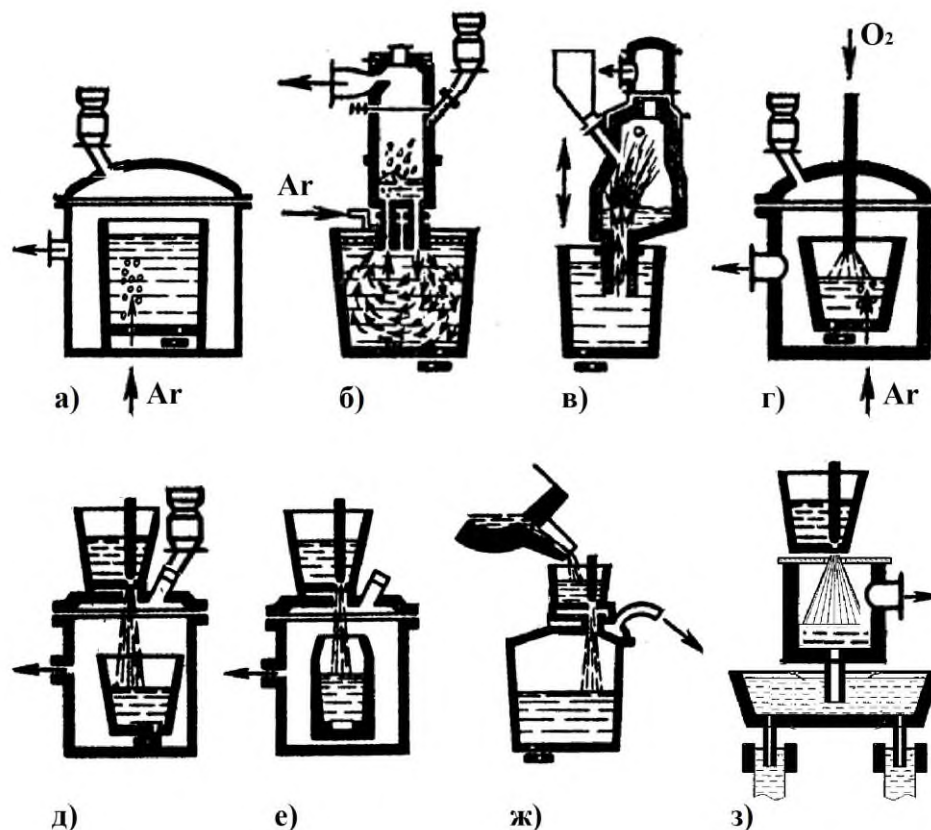


Рисунок 2 – Основные способы вакуумной обработки стали (обозначения в тексте)

Наиболее простым вариантом вакуумирования является обработка металла в ковше, помещенном в вакуумную камеру (рисунок 2, а), в которой создается разрежение, способствующее удалению газов из расплава. Поскольку действие вакуума на жидкую сталь с плотностью $\sim 7 \text{ т/м}^3$ распространяется на глубину не более 1,43 м, то при вакуумировании без принудительного перемешивания нижние слои металла дегазации не подвергаются. Поэтому эффективность этого способа обеспечивается только при перемешивании металла в ковше при помощи инертного газа (или электромагнитного поля), который подается через пористую пробку (расход 0,02-0,06 $\text{м}^3/\text{т}$), установленную в днище ковша (рисунок 2, г). Длительность вакуумирования при этом составляет обычно от 15 до 30 мин (при общей длительности обработки до 50 мин). Недостатком этого варианта обработки является необходимость поддерживать уровень металла в

ковше на ~ 1 м ниже уровня его верха («свободный борт») для предупреждения выбросов металла при «кипении», что ограничивает массу обрабатываемого металла. Для решения проблемы свободного борта используют надставки различных конструкций.

Для вакуумной обработки больших масс металла используют способы порционного (DH-процесс) и циркуляционного (RH-процесс) вакуумирования. При циркуляционном вакуумировании (рисунок 2, б) два патрубка вакуумной камеры опускают в металл. При создании разрежения жидкая сталь поднимается в вакуумную камеру на определенную высоту (не более 1,4 м от уровня металла в ковше). Циркуляция металла между ковшом и вакуумной камерой обеспечивается благодаря подаче в подъемный патрубок аргона (через пористую огнеупорную вставку с расходом 0,5-1,5 м³/мин), разрыхляющего металл, в результате чего снижается плотность металла в трубке, что вызывает всасывание в вакуумную камеру дополнительного количества металла. При этом, вследствие увеличения уровня металла в вакуумной камере, происходит вытеснение более плотного металла, который вытекает по сливному патрубку, а поступающая по подъемному патрубку газо-металлическая смесь (с пониженной плотностью) подвергается вакуумированию (дегазации). Скорость циркуляции металла зависит от разрежения в вакуумной камере, диаметра всасывающего патрубка и расхода аргона. Обычно эти параметры выбирают так, чтобы через вакуумную камеру можно было пропустить весь металл один раз за 3-5 мин. Поскольку для эффективного вакуумирования необходимо 4-5 кратная обработка металла (коэффициент циркуляции), то общая продолжительность вакуумирования составляет 15-25 мин.

При порционном вакуумировании (рисунок, 2 в) металл под воздействием разрежения засасывается в вакуумную камеру порциями через футерованный патрубок, нижний конец которого постоянно находится в металле. Параметры камеры рассчитывают так, чтобы обеспечивать засасывание в один прием 10-12 % металла от общей массы его в ковше. После выдержки металла в камере под вакуумом, производят слив порции металла обратно в ковш, для чего или осуществляют подъем вакуумной камеры или опускают вниз ковш (при вместимости менее 100 т). Один цикл обработки (включая всасывание и слив металла) обычно продолжается 15-30 с, поэтому при 4-5 кратной обработке металла общая продолжительность вакуумирования не превышает 25 мин.

Недостатками порционного и циркуляционного вакуумирования являются сложность оборудования и низкая стойкость патрубков (до 100 плавов). Однако высокая эффективности и стабильность показателей, обеспечивают широкое распространение этих способов.

Наиболее благоприятные условия для рафинирования в вакууме складываются при обработке струи металла. Это объясняется тем, что струя жидкого ме-

талла, попадая в вакуум, разбрызгивается, вследствие чего многократно увеличивается поверхность контакта «металл-разреженная атмосфера» и создаются очень благоприятные условия для дегазации. Струйное вакуумирование осуществляется в процессе перелива или разливки металла по следующим вариантам:

- при переливе из ковша в ковш (рисунок 2, д);
- при разливке в изложницу (рисунок 2, е);
- на выпуске из сталеплавильного агрегата (рисунок 2, ж);
- при непрерывной разливке стали в процессе перелива из стальной ковша в промежуточный ковш машины непрерывного литья заготовок (рисунок 2, з).

Вакуумирование струи металла обеспечивает эффективное рафинирование стали, но связано со значительными технологическими и организационными затруднениями (несколько промежуточных емкостей) и большими потерями тепла (дополнительное снижение температуры от 15-20 °С при разливке в изложницы до 50-70 °С и более при переливах). Поэтому струйное вакуумирование применяется в промышленных масштабах только при отливке в изложницы крупных слитков для поковок (рисунок 2, е), что исключает повторное поглощение газов из атмосферы и образование флокенов.

Перспективным является организация одновременной дегазации металла и защиты от вторичного окисления (при минимальных потерях температуры 15-20 °С) при вакуумировании струи металла в процессе непрерывной разливки стали (рисунок 2, з), когда рафинирование струи проводится в проточной камере, которая размещена между сталеразливочным и промежуточным ковшами. Основным недостатком этого способа вакуумирования является необходимость увеличения расстояния между сталеразливочным и промежуточным ковшами, что невозможно в действующих цехах.

При других способах вакуумирования (в ковше) необходимо учитывать возможное повторное поглощение газов из атмосферы, для предотвращения которого поверхность металла в ковше защищают покровным слоем шлака, а разливку ведут «закрытой» струей или в среде инертного газа.

Общим недостатком различных способов вакуумирования стали является значительные потери температуры металла, которые, в зависимости от принятой технологии вакуумирования, могут изменяться от 20 до 100 °С, что необходимо учитывать при разработке технологии выплавки стали.

Лучшие результаты достигаются при вакуумировании нераскисленного металла, при котором обеспечивается более интенсивное перемешивание. При этом место вакуумирования в общей технологической цепи ковшевой обработки определяется в зависимости от решаемых задач:

- вакуумирование нераскисленной стали (кроме удаления водорода) обеспечивает снижение концентрации кислорода до 0,002-0,003 % в результате

вакуумно-углеродного раскисления. В результате, при последующем глубинном раскислении металла образование первичных эндогенных включений, особенно силикатных, минимизируется. Поэтому проведение вакуумирования до раскисления рекомендуется при производстве стали с минимальным содержанием крупных оксидных включений;

– вакуумирование раскисленного металла проводят, в первую очередь, для удаления водорода и азота, а также удаления первичных неметаллических включений (после раскисления).

Отдельное место в технологии вакуумирования занимает вакуум-кислородное обезуглероживание металла (за рубежом – VOD-процесс – от англ. Vacuum, Oxygen, Decarburisation — вакуум, кислород, обезуглероживание), при котором нераскисленный металл, находящийся под действием вакуума, продувают кислородом (рисунок, г). Это создает благоприятные условия для протекания реакции обезуглероживания $[C] + [O] = \{CO\}$ и обеспечивает глубокое обезуглероживание расплава (до $[C] = 0,002-0,005 \%$) с одновременным удалением водорода.

Недостатком вакуум-кислородного обезуглероживания в ковше (рисунок 2, г) является необходимость иметь величину свободного борта не менее 0,8-1,0 м во избежание перелива металла и шлака через борт ковша при интенсивном кипении металла (протекании реакции $[C] + [O] = \{CO\}$). Эта проблема решается при проведении вакуум-кислородного обезуглероживания в установках циркуляционного вакуумирования.

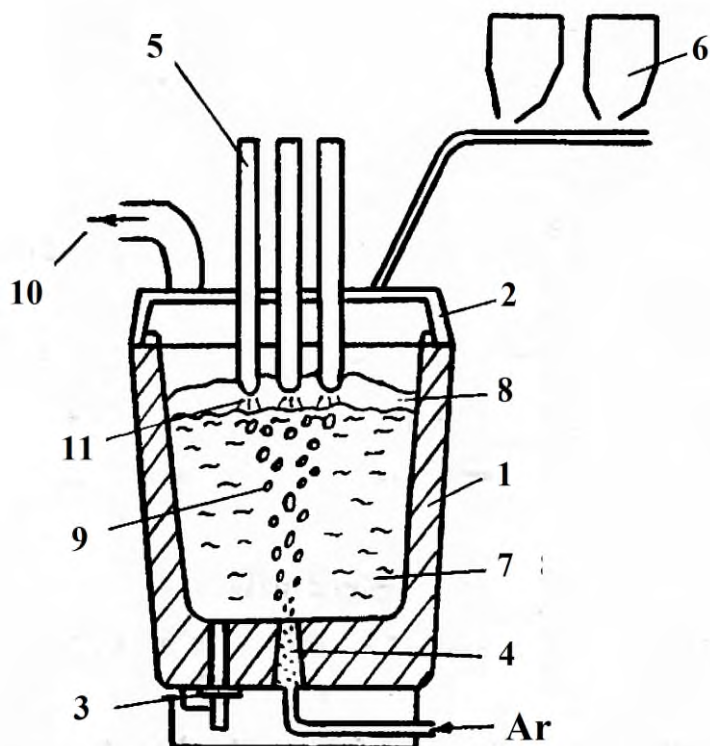
1.9 Комплексная обработка стали в ковше

В современных условиях для обеспечения эффективного производства металла заданного качества целесообразно совмещать несколько видов внепечной обработки, то есть проводить комплексную обработку стали при минимальном количестве агрегатов или устройств для этого (лучше всего один агрегат).

Современным вариантом установки комплексной обработки стали является установка «ковш-печь» (УКП) или LF (от англ. – ladle-furnace). Установки «ковш-печь» в России обычно называют агрегатами комплексной обработки стали (АКОС) или установками стабилизации и доводки металла (УСДМ). Общая компоновка установок типа «ковш-печь» показана на рисунке 3.

Установки «ковш-печь» позволяют осуществлять дуговой подогрев металла в ковше, присадку легирующих и раскислителей при перемешивании металла (продувкой расплава в ковше инертным газом), обработку металла покровным шлаком, продувку порошками, введение раскислителей и десульфуратов в виде порошковой проволоки и др. Таким образом, возможность нагрева металла на установке «ковш-печь» позволяет не только снизить перегрев расплава в ста-

леплавильном агрегате, но и провести следующие операции: раскисление и легирование с повышенным расходом материалов, глубокую десульфурацию металла, усреднение температуры и состава, а также дегазацию и удаление неметаллических включений.



- 1 – ковш; 2 – крышка ковша; 3 – шибберный затвор; 4 – пористая пробка;
 5 – электроды; 6 – бункер для сыпучих материалов; 7 – жидкий металл;
 8 – основной восстановительный шлак; 9 – пузыри аргона;
 10 – отходящие газы; 11 - электрическая дуга

Рисунок 3 – Схема установки «ковш-печь»

Продувка металла аргоном при этом обеспечивает не только дегазацию металла, но и его перемешивание, благодаря чему ускоряется расплавление присаживаемых в ковш ферросплавов и обеспечивается усреднение расплава по химическому составу и температуре, существенно улучшается взаимодействие металла и шлака, то есть десульфурация металла.

Эффективное использование возможностей установки «ковш-печь» обеспечивается при соблюдении следующих технологических рекомендаций:

- предварительное раскисление металла в ковше на выпуске с получением в металле концентрации основных раскисляющих и легирующих элементов (Mn, Si, Al) по нижнему пределу их содержания в готовой стали;
- качественная отсечка печного шлака, попадание которого в сталеразливочный ковш усложняет наводку основного восстановительного шлака, повышает угар ферросплавов и оказывает разрушающее воздействие на футеровку

ковша;

– обеспечение уровня «свободного борта» в ковше не менее 500 мм, что позволяет наводить шлак толщиной 100-150 мм и предотвращать выплескивание шлака при продувке инертным газом.

Таким образом, современные установки «ковш-печь» позволяют успешно провести доводку стали, используя все элементы ковшевой доводки, кроме вакуумирования. Внеагрегатное вакуумирование стали удобнее осуществлять на отдельных установках, однако существуют варианты агрегатов комплексной обработки стали с вакуумированием. Примером такого агрегата является установка циркуляционного вакуумирования, позволяющая выполнять следующие технологические операции:

– введение кислорода в вакуумную камеру с целью интенсификации обезуглероживания и дополнительного подогрева металла;

– подача в вакуум-камеру алюминия (в виде проволоки или гранул) с последующим его окислением для подогрева металла в процессе его обработки;

– подача в вакуум-камеру шлакообразующих материалов на основе извести и плавикового шпата.

Конструкции установок «ковш-печь» позволяют эффективно рафинировать металл в требуемых пределах. При этом функциональный набор технологических операций, обеспечивающих получение заданного качества металла, подбирается индивидуально с целью полного и эффективного использования возможностей установки комплексной обработки стали.

1.10 Процессы, происходящие во время выпуска и разливки стали

Кроме технологических процессов подготовки стали к разливке необходимо учитывать естественные процессы, протекающие в период от начала выпуска до завершения разливки.

Во время выпуска сталь взаимодействует с кислородом и азотом воздуха, шлаком и футеровкой желоба и ковша. В ковше производится раскисление стали, происходит образование и удаление из него неметаллических включений, снижается температура металла и шлака, изменяется их состав.

В процессе выпуска:

1. При выпуске предварительно раскисленного в печи металла, общее содержание кислорода повышается и может достигнуть того значения, которое было до раскисления. Поэтому **предварительное раскисление стали в печи, особенно малоуглеродистой, нецелесообразно.**

2. При выпуске нераскисленной кипящей стали, напротив, отмечается обычно снижение окисленности металла – за счет активизации реакции $C+[O]=CO$ (углеродное раскисление) при снижении ферростатического давления стали в

струе. Выделяющийся на желобе СО экранирует струю от контакта с атмосферой, что минимизирует азотирование. В процессе разливки окисляется до 0,02 % углерода.

3. При контакте струи металла с атмосферой возможно поглощение азота. Этому способствует более высокое, чем в плавильном агрегате, парциальное давление N_2 и отсутствие защиты слоем шлака. Так, например, на ММК при сливе металла из большегрузного конвертера отмечено увеличение $[N]$ с 0,003-0,004 до 0,005-0,007%, то есть на 0,002-0,003%.

4. Охлаждение металла: в процессе выпуска на 20-50 °С в зависимости от емкости сталеплавильного агрегата (вместимости и конструкции ковша)

В целом **результат взаимодействия металла с атмосферой во время выпуска** определяется удельной величиной поверхности и временем контакта, то есть характером струи, а также зависит от состава газовой фазы, непосредственно примыкающей к поверхности металла, и от ее состава.

Во время ковшевой обработки, выдержки и разливки:

4. Раскисление в ковше на выпуске глубинным способом.

5. При продувке инертным газом (от 2-3 до 10-15 минут при расходе газа от 0,2 до 2-3 м³/т): всплывание частиц шлаковых, огнеупорных включений и продуктов раскисления, равномерное распределение элементов-раскислителей, присаженных в ковш, выравнивание температуры, выделение растворенных в стали газов, а также дополнительное охлаждение на 1-2 °С/мин).

6. Охлаждение металла во время выдержки в ковше на 0,3-1,5 °С/мин в зависимости от объема ковша и его конструкции.

7. Рефосфорация – обратный переход фосфора из «печного» шлака, попадающего в сталеразливочный ковш на выпуске. Поэтому попадание печного шлака в ковш (более 0,5-1 % от массы металла) нежелательно. Кроме рефосфорации, попадание избыточного количества печного шлака в ковш может привести к повышенному угару раскислителей и переходу части газов из шлака в металл.

8. Повышение содержания фосфора в металле из ферросплавов с повышенным содержанием фосфора (главным образом из ферромарганца): на 0,005-0,010% в зависимости от степени легирования.

9. Десульфурация при обработке твердыми шлаковыми смесями на основе извести и плавикового шпата (высокосновный восстановительный шлак).

10. Дегазация стали при вакуумной обработке.

Во время разливки стали:

11. Повторное окисление металла, при котором общее содержание кислорода может увеличиваться в два-три раза. Наиболее склонен к вторичному окислению глубокораскисленный металл.

12. Азотирование стали на 0,001-0,002 %.

13. Снижение температуры на 0,3-1,5°С/мин в зависимости от объема ковша.

1.11 Контрольные вопросы для самопроверки

1. Чем характеризуется эффективность термомеханической обработки стали?
2. Что из себя представляет непрерывнолитая заготовка и слиток, получаемый разливкой стали в изложницу?
3. От чего зависит выход годного в результате термомеханической обработки?
4. От чего зависит получение заданных эксплуатационных свойств изделия?
5. От чего зависит качество стального слитка/заготовки?
6. Какова оптимальная температура перегрева (над температурой плавления) разливаемого металла?
7. Что из себя представляет сталеразливочный ковш?
8. Когда и с какой целью проводят раскисление стали?
9. В чем проявляется вредное влияние кислорода на свойства стали?
10. Какой из способов раскисления наиболее широко применяется на практике?
11. Каким показателем характеризуется раскислительная способность элементов-раскислителей при глубинном раскислении стали?
12. Когда следует вводить раскислители при проведении глубинного раскисления для максимального усвоения элементов-раскислителей?
13. Какой уровень угара марганца (из ферросплава), кремния (из ферросплава) и алюминия при раскислении стали в ковше?
14. Каковы достоинства и недостатки различных способов раскисления стали?
15. Каковы основные реакции различных способов раскисления стали?
16. В чем проявляется вредное влияние водорода на свойства стали?
17. В чем проявляется вредное влияние азота на свойства стали?
18. При какой предельной концентрации азота в стали возможно образование нитридов?
19. При какой предельной концентрации водорода в стали возможно выделение его в самостоятельную газовую фазу?
20. Какие факторы обуславливают негативное воздействие неметаллических включений на свойства стали?
21. Неметаллические включения какого вида доминируют по абсолютному содержанию в высококачественных углеродистых сталях?
22. От чего зависит скорость всплывания неметаллических включений?
23. В чем заключается цель операции по легированию стали?
24. Каким способом проводят легирование стали?
25. В какой период проявляется влияние микролегирования на свойства стали?
26. В какой период проявляется влияние модифицирования на свойства стали?
27. На какие процессы в металле влияет продувка стали инертным газом?
28. При каких вариантах подачи инертного газа обеспечивается более высокая эффективность продувки?

29. Какие условия продувки оказывают влияние на его эффективность?
30. Как влияет расход инертного газа и продолжительность продувки на результаты продувки металла инертным газом?
31. Какие условия способствуют удалению фосфора и серы из металла в шлак?
32. Как оценивается величина основности шлака в сталеплавильных процессах?
33. Как на практике оценивают окислительную способность (окисленность) шлака?
34. Какие способы ковшевой десульфурации стали применяют на практике?
35. Укажите условия эффективной десульфурации стали твердыми шлаковыми смесями.
36. Укажите условия эффективной работы металлического кальция и магния, вводимых в металл для десульфурации (и модифицирования) стали.
37. Какие задачи решаются с помощью вакуумной обработки стали?
38. Способы и показатели вакуумной обработки стали.
39. Достоинства и недостатки различных способов вакуумной обработки стали.
40. Что такое «свободный борт» сталеразливочного ковша?
41. За счет чего обеспечивается циркуляция металла между ковшом и вакуумной камерой при циркуляционном способе вакуумирования?
42. Что не происходит с металлом при выпуске нераскисленной кипящей стали?
43. Какой вариант выпуска металла из сталеплавильного агрегата наиболее целесообразен?
44. Протекание какой реакции на выпуске нераскисленной кипящей стали способствует снижению степени азотирования металла?
45. Насколько снижается температура металла на выпуске в сталеразливочный ковш?
46. Какова величина дополнительного охлаждающего эффекта при продувке стали инертным газом?
47. Насколько снижается температура металла во время выдержки в ковше?
48. Что такое рефосфорация, её причины и способы предотвращения?
49. К каким последствиям приводит попадание печного шлака в сталеразливочный ковш?
50. Укажите возможное увеличение содержания фосфора в металле в результате его перехода из ферросплавов в процессе раскисления стали.
51. С каким естественным процессом необходимо бороться при организации разливки стали?
52. Укажите величину возможного азотирования стали в процессе её выпуска из сталеплавильного агрегата.

Тема 2 Основные положения теории кристаллизации

2.1 Сущность кристаллизации и условия зарождения кристаллов

Сущность процесса кристаллизации стали заключается в **переходе её из жидкого состояния в твердое**. При этом, процесс кристаллизации складывается из **двух стадий** – зарождения кристаллов и последующего их роста.

Условия зарождения кристаллов.

Согласно 2-му закону термодинамики любая система стремится к состоянию покоя, характеризуемому минимальным запасом свободной энергии (G). Свободная энергия вещества ($G = U - TS$), как часть полной энергии (U) за минусом связанной ($T \cdot S$) в различном агрегатном состоянии снижается с повышением температуры, но с различной скоростью (рисунок 4).

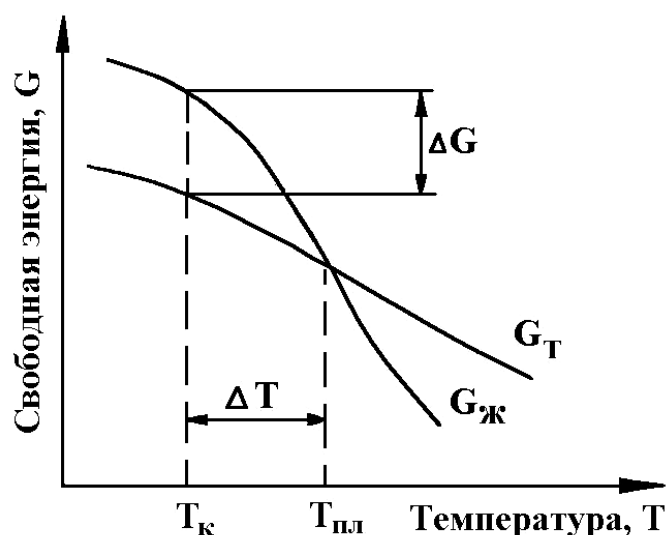


Рисунок 4 – Изменение свободной энергии металла в жидком ($G_{ж}$) и твердом ($G_{т}$) состояниях в зависимости от температуры

При определенной температуре, называемой **теоретической температурой плавления**, термодинамически одинаково вероятно наличие в системе как жидкой, так и твердой фаз. При этой температуре свободная энергия чистого металла в жидком и твердом состояниях одинакова. Выше температуры плавления устойчивым является жидкое состояние $G_{ж} < G_{тв}$ и наоборот. Поэтому, при температуре плавления процесс кристаллизации не начинается. Он развивается в том случае, если созданы условия, при которых возникает разность свободных энергий (ΔG), то есть при некоторой **температуре кристаллизации** и некоторой величине переохлаждения (ниже теоретической температуры плавления).

Необходимая для начала кристаллизации величина переохлаждения расплава определяется процессами, протекающими при затвердевании.

Как известно условием самопроизвольного протекания любого процесса, в

том числе и процесса кристаллизации, является снижение запаса свободной энергии в системе (металле). В процессе кристаллизации, который заключается в образовании зародышей твердой фазы, **изменение свободной энергии металла** происходит из-за перехода некоторого объема жидкой фазы с большим уровнем энергии в твердую фазу с меньшим уровнем энергии, а также в результате возникновения межфазной поверхности (границы раздела фаз), на образование которой требуется дополнительная энергия.

Таким образом, в процессе образования зародыша свободная энергия системы **с одной стороны возрастает** в результате **затраты энергии на образование поверхности раздела «расплав – зародыш»**

$$\Delta G_S = 4\sigma\pi r^2,$$

где r – радиус зародыша новой фазы (для упрощения описания полагаем, что зародыш имеет форму шара);

σ – межфазное натяжение на границе раздела жидкой и твердой фаз (удельная поверхностная энергия), которое определяет работу по созданию границы раздела,

С другой стороны, свободная энергия системы **уменьшается в результате перехода части жидкости в твердую фазу, у которой уровень свободной энергии ниже**

$$\Delta G_V = (G_{ТВ} - G_{Ж}) \frac{4}{3} \pi r^3 = Q_{кр} \cdot \frac{\Delta T}{T_{кр}} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3.$$

Для затвердевания некоторого объема жидкости (определяется радиусом) необходима такая величина переохлаждения расплава (этого объема), при которой снижение объемной свободной энергии (от перехода части жидкой фазы в твердую) ΔG_V будет больше (по модулю), чем повышение энергии системы в результате образования **поверхности раздела «расплав – зародыш»** ΔG_S , тогда выполняется условие самопроизвольного протекания процессов

$$\Delta G = \Delta G_V + \Delta G_S < 0.$$

Таким образом, при теоретической температуре плавления свободная энергия жидкой и твердой фаз равны и образование зародыша невозможно, так как нет источника для компенсации затрат энергии на образование поверхности раздела фаз. Поэтому для образования зародыша необходимо некоторое переохлаждение расплава.

При некоторой величине переохлаждения термодинамически устойчивыми, то есть способными к дальнейшему росту (рисунок 5), оказываются те зародыши, размер которых превысит так называемый «критический», величина которого определяется из выражения:

$$r_{кр} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot T_{кр}}{Q_{кр} \cdot \Delta T},$$

где σ – межфазное натяжение на границе раздела жидкой и твердой фаз, которое определяет работу по созданию границы раздела;

$T_{кр}$ – теоретическая температура плавления (кристаллизации);

ΔT – величина переохлаждения;

$Q_{кр}$ – скрытая удельная теплота кристаллизации – тепло, выделяющееся при переходе из жидкого в твердое, пропорциональная относительно изменению температуры.

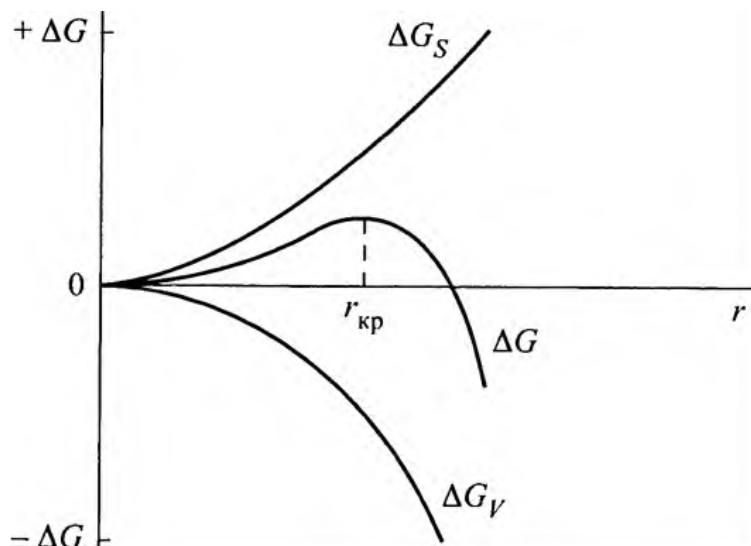


Рисунок 5 – Изменение свободной энергии Гиббса чистого металла от радиуса зародыша

Таким образом, на процесс кристаллизации решающее влияние оказывают степень переохлаждения и удельная поверхностная энергия на границе кристалл-жидкость. При увеличении степени переохлаждения критический радиус зародыша уменьшается, т.е. термодинамически устойчивыми становятся более мелкие зародыши. Аналогичное влияние оказывает уменьшение величины поверхностной энергии σ .

Различают гомогенное и гетерогенное зарождение кристаллов.

Под **гомогенным** подразумевают образование зародышей кристалла в объеме жидкой фазы, под **гетерогенным** – на имеющейся межфазной поверхности (на поверхности находящихся в расплаве твердых частиц – например, неметал-

лических включений, стенок изложниц и кристаллизаторов).

Гомогенное зарождение. Приближенные расчеты показывают, что гомогенное зарождение кристалла для металлов возможно при переохлаждении, равном $0,2 \cdot T_{кр}$, т. е. около $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ для железа. Однако величина переохлаждения стали у фронта кристаллизации обычно не превышает $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Следовательно, кристаллизация по гомогенному механизму на практике не реализуется.

В реальных условиях механизм затвердевания имеет гетерогенный характер, когда образование и рост зародыша происходят на уже имеющейся поверхности раздела – центрах кристаллизации, что существенно снижает затраты энергии на образование границы раздела фаз. Процесс зарождения и роста кристаллов в этом случае существенно облегчается – в реальных условиях сталь начинает кристаллизоваться при переохлаждении в несколько градусов.

На практике, с целью воздействия на структуру затвердевшего металла – измельчения зерна, пользуются созданием в металле центров кристаллизации, для чего в металл вводят элементы, образующие с кислородом, водородом и азотом тугоплавкие устойчивые соединения, которые и служат центрами кристаллизации. При этом измельчается зерно и улучшаются механические свойства металла. Эта технологическая операция называется **модифицированием**. В качестве модифицирующих добавок используют элементы (РЗМ (La, Ce, Pr, Nd), ЩЗМ (Ca, Ba, Sr), Ti, Zr, образующие в стали тугоплавкие оксиды и нитриды, температура плавления которых выше, чем у железа.

2.2 Условия роста кристаллов и закономерности формирования структуры затвердевшего металла

В формировании структуры слитка/заготовки не меньшую роль играет последующий рост кристаллов, который определяется интенсивностью и направленностью отвода тепла.

Зарождающийся кристалл имеет правильную форму, определяемую типом кристаллической решетки твердого металла. Однако вскоре после зарождения правильный рост возникшего кристалла прекращается и **начинается преимущественный рост его вершин**, то есть ветвей кристалла. В результате из зародыша правильной формы образуется кристалл **древовидной формы** – дендрит. Объясняется это следующим:

- меньшими энергетическими затратами на образование новой границе раздела при росте ветвей кристалла (на один уровень атомов);
- развитием ликвации у фронта кристаллизации, в результате чего обогащенный ликватами (S, P, C и др.) металл с пониженной температурой плавления вытесняется в межосные пространства, тормозя рост граней.

Таким образом, от вершин кристалла вырастают оси первого порядка

(стволы дендрита), на них перпендикулярно направленные оси второго порядка (ветви), на которых аналогичным образом развиваются оси третьего порядка и т. д. Появление все новых осей и их постепенное утолщение приводят к формированию сплошного кристалла (дендрита).

При отсутствии направленного теплоотвода оси во всех направлениях развиваются примерно одинаково и кристалл получается **равноосным**. При направленном теплоотводе кристаллы имеют вытянутую форму (столбчатые).

Вид структуры слитка/заготовки определяется условиями охлаждения. Качественная связь между скоростью образования центров кристаллизации, линейной скоростью роста кристаллов и величиной переохлаждения (ΔT) представлена на рисунке 6.

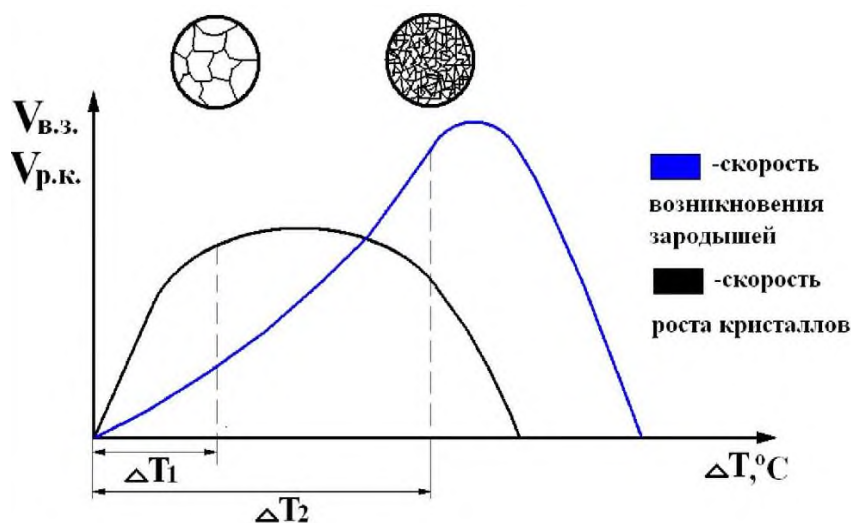


Рисунок 6 – Зависимость линейной скорости роста кристаллов ($V_{р.к.}$) и скорости возникновения зародышей ($V_{в.з.}$) от величины переохлаждения металла

При высокой степени переохлаждения (при первоначальном контакте жидкого металла с холодной стенкой изложницы или кристаллизатора — ΔT_2) число образовавшихся зародышей велико, а скорость роста зерна ограничена. В этом случае формируется мелкозернистая структура. По мере уменьшения переохлаждения скорость образования зародышей снижается быстрее, чем скорость их линейного роста, поэтому кристаллы будут развиваться до больших размеров — формируется крупнозернистая структура (ΔT_1).

Скорость роста кристаллов определяется в первую очередь интенсивностью теплоотвода: чем больше скорость теплоотвода и чем больше переохлаждение жидкого металла, тем больше будет скорость роста. Рост кристаллов протекает одинаково как в случае гомогенного, так и в случае гетерогенного их зарождения.

2.3 Интервал и скорость кристаллизации

Интервал кристаллизации – температурный интервал, в котором происходит затвердевание многокомпонентных сплавов. Такое поведение сплавов связано с явлением *«избирательной кристаллизации»* - явление (при затвердевании многокомпонентных сплавов), заключающееся в преимущественном затвердевании более тугоплавких участков сплава, формирующихся у фронта кристаллизации из-за снижения растворимости ряда примесей (С, S, Р и др.) при охлаждении. Поэтому ветви кристаллов растут преимущественно в результате затвердевания металла, обедненного углеродом и другими составляющими стали. При этом в жидкой фазе концентрация примесей растет, а температура плавления такого металла падает. В результате последующие оси кристалла формируются при все более низкой температуре, а содержание примесей в них возрастает. Таким образом, формируется *дендритная ликвация* – химическая неоднородность в пределах одного кристалла (дендрита): содержание примеси в осях дендритов ниже, чем в межосных объемах.

В результате естественной диффузии и конвективных потоков обогащенные ликватами объемы металла выносятся в центр, снижая температуру затвердевания жидкой фазы и приводя к развитию *зональной ликвации* – неоднородности состава стали в различных частях слитка/заготовки. К образованию зональной ликвации склонны сера, фосфор, углерод и кислород.

Таким образом, первые порции металла, контактирующие с холодной стенкой изложницы/кристаллизатора, вследствие значительного переохлаждения затвердевают без заметной ликвации при незначительном переохлаждении ниже температуры плавления исходного сплава. Осевая часть заготовки/слитка, металл в которой обогащен ликватами, имеет более низкую температуру плавления, и затвердевает в последнюю очередь.

Величина интервала кристаллизации определяется составом стали и скоростью охлаждения. Она возрастает при увеличении содержания в стали углерода и легирующих элементов, и снижается с повышением скорости охлаждения (т.к. снижается продолжительность затвердевания и развития ликвации). При увеличении интервала кристаллизации возрастает степень зональной химической неоднородности слитка/заготовки. Таким образом, явление «избирательной кристаллизации» является причиной химической неоднородности слитка/заготовки.

Скорость затвердевания. При затвердевании стали в изложнице/кристаллизаторе тепло отводится через стенки, поэтому зарождение и рост кристаллов начинаются у стенок изложницы/кристаллизатора, а толщина затвердевшего слоя непрерывно возрастает в направлении к центру слитка/заготовки. Средняя скорость затвердевания (мм/мин) определяется толщичи-

ной затвердевшего слоя и длительностью его формирования.

Толщину затвердевшего слоя металла в изложнице/кристаллизаторе приближенно можно определить по формуле:

$$\xi = k\sqrt{\tau / K\phi},$$

где ξ – толщина закристаллизовавшегося металла, мм;

τ – продолжительность затвердевания, мин;

$K\phi$ – коэффициент формы слитка/заготовки, который линейно изменяется от 0,75 для заготовки с отношением ширины к толщине $b/a = 1$ до 1 при отношении $b/a \geq 2$.

k – коэффициент затвердевания, $27 \text{ мм/мин}^{1/2}$.

Коэффициент затвердевания зависит от перегрева, состава и поведения стали при затвердевании. Для сталей различного состава при нормальной величине перегрева в 10-20 °С он обычно изменяется от 22-23 для кипящей стали, 24-25 для полуспокойной и 26-27 $\text{мм/мин}^{1/2}$ для спокойной. С повышением перегрева на каждые 10 °С коэффициент затвердевания снижается на 1 $\text{мм/мин}^{1/2}$.

2.4 Контрольные вопросы для самопроверки

1. Из каких стадий складывается процесс кристаллизации стали?
2. Что такое теоретическая температура плавления (кристаллизации)?
3. Зачем для формирования устойчивого зародыша твердой фазы и начала кристаллизации необходимо переохлаждение расплава ниже теоретической температуры плавления?
4. Что такое критический размер зародыша?
5. Что оказывает наиболее значимое влияние на величину критического радиуса зародыша?
6. Что понимают под гомогенным механизмом зарождения кристаллов новой фазы?
7. Что понимают под гетерогенным механизмом зарождения кристаллов новой фазы?
8. Какой механизм образования зародышей кристаллов реализуется на практике?
9. При каких условиях формируется мелкозернистая кристаллическая структура?
10. При каких условиях формируются равноосная крупнозернистая кристаллическая структура?
11. Что такое интервал кристаллизации и от чего он зависит?

12. Виды ликвации их причины и влияние на структуру и свойства стали.
13. Что такое избирательная кристаллизация?
14. От чего зависит толщина затвердевшей корочки?
15. Что характеризует коэффициента затвердевания и как изменяется его величина при изменении температуры перегрева металла?
16. В каком диапазоне изменяется коэффициент формы слитка/заготовки, учитываемый при расчете толщины затвердевшей корочки и продолжительности затвердевания?

Тема 3 Способы разливки и их сравнительная характеристика

3.1 Способы разливки стали

Применяют два основных способа разливки стали: разливку в изложницы и непрерывную разливку.

Разливку в изложницы подразделяют на разливку сверху и сифоном.

При разливке сверху (рисунок 7, а) сталь непосредственно из сталеразливочного ковша (1) поступает в изложницы (2), устанавливаемые на чугунных плитах – поддонах (3).

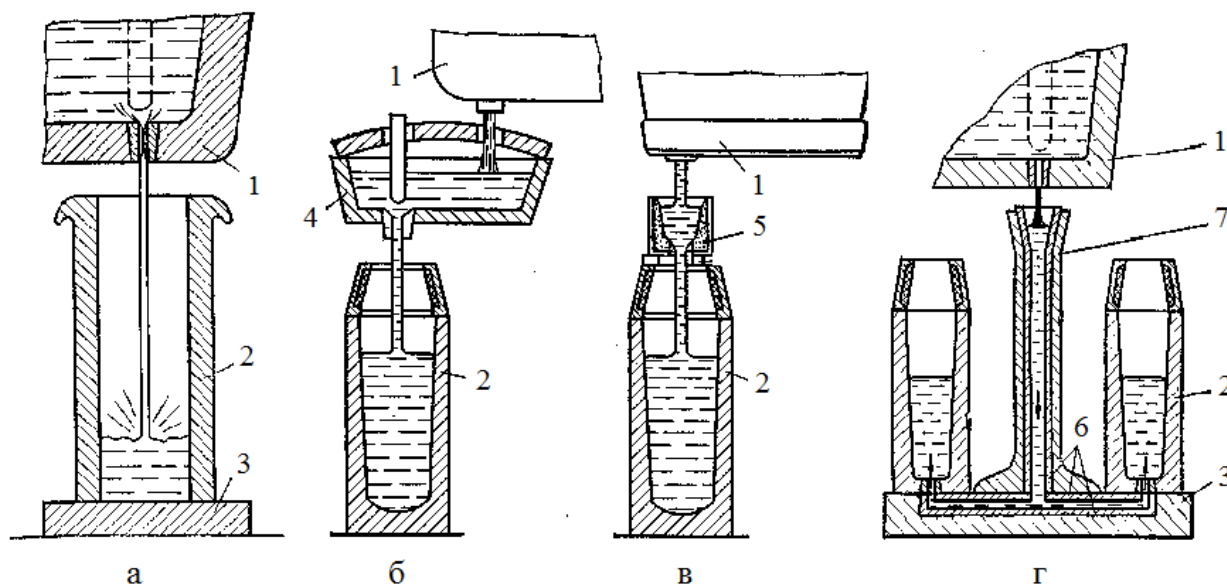


Рисунок 7 – Схема разливки стали сверху (а, б, в) и сифонным способом (г) (обозначения в тексте)

После наполнения каждой изложницы стопор или шиберный затвор сталеразливочного ковша закрывают, ковш транспортируют к следующей изложнице и повторяют цикл разливки.

Для снижения продолжительности разливки плавки, что особенно актуально при разливке стали на мелкие слитки, применяют двухстопорные ковши или промежуточные ковши с несколькими разливочными стаканами, что позволяет одновременно заполнять две и более изложницы. С целью уменьшения напора струи и разбрызгивания металла на стенки изложниц разливку сверху ведут через промежуточные ковши (поз. 4 на рисунке 7, б) или через промежуточные воронки (поз. 5 на рисунке 7, в).

При сифонной разливке (рисунок 7, г), основанной на принципе сообщающихся сосудов, сталью одновременно заполняют несколько (от двух до шестидесяти) изложниц. Жидкая сталь из сталеразливочного ковша (1) поступает в установленный на поддоне (3) футерованный изнутри центральной литник (7), а из него по футерованным каналам поддона (6) в изложницы (2) снизу.

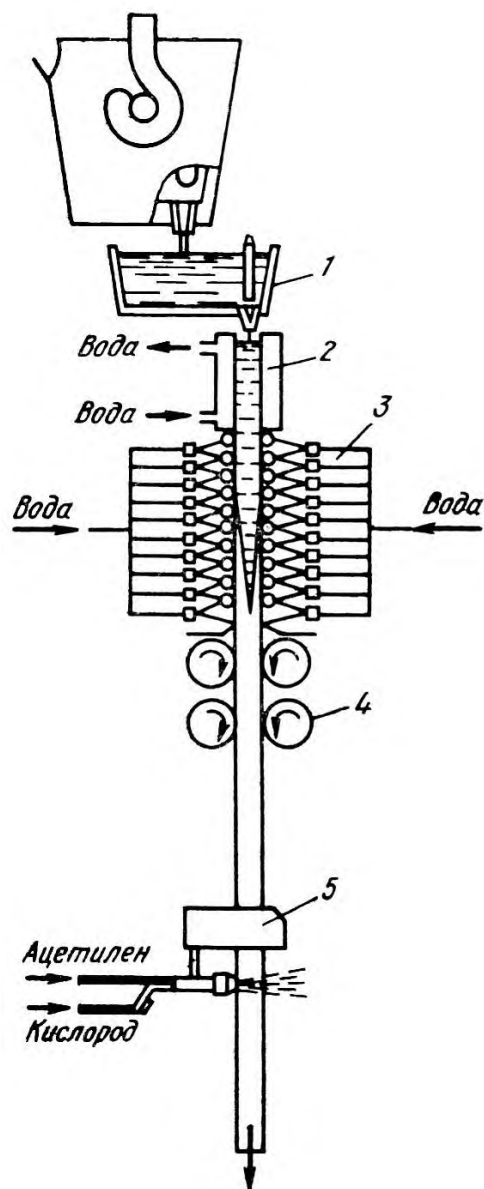
Центровой литник и изложницы устанавливают на массивной чугунной плите – поддоне, имеющей канавки, в которые укладывают пустотелый сифонный кирпич. После наполнения всех установленных на поддоне изложниц стопор (шиберный затвор) закрывают, и ковш транспортируют к следующему поддону.

Сущность непрерывной разливки стали

Предпосылками создания непрерывной разливки является желание повысить выход годного при разливке спокойной стали при одновременном снижении ликвации и уменьшении трудоемкости прокатки. Предположительно, заявку на выдачу патента на первую установку непрерывной разливки с независимой сквозной формой подал R.M. Daelen (Германия, Дюссельдорф) в 1887 г. В следующие десятилетия, в особенности, в период с 1920 до 1935 годы, было сначала разработано непрерывное литьё заготовок из цветных металлов, в частности, меди и алюминия. Агрегаты для разливки стали этим методом называют машинами непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) или установками непрерывной разливки стали (УНРС).

Первые МНЛЗ для разливки стали появились в конце 50-х годов XX века. В настоящее время непрерывным способом разливают подавляющее количество жидкой стали с получением заготовок для массового производства продукции. Разливку в изложницы используют для отливки изделий сложного профиля или единичного производства.

Способ непрерывной разливки заключается в том, что жидкую сталь заливают в интенсивно охлаждаемую сквозную медную форму – кристаллизатор, где формируется корочка НЛЗ – оболочка будущей заготовки. Заготовку с не полностью затвердевшей сердцевиной непрерывно вытягивают из кристаллизатора и дополнительно охлаждают в так называемой зоне вторичного охлаждения водой (ЗВО), распыляемой форсунками. В результате в процессе



- 1 – промежуточный ковш;
- 2 – кристаллизатор;
- 3 – зона вторичного охлаждения;
- 4 – тянущая клетка;
- 5 – устройство порезки заготовки

Рисунок 8 – Схема непрерывной разливки стали

непрерывной заливки металла и его затвердевания образуется непрерывнолитая заготовка (НЛЗ).

При использовании МНЛЗ (рисунок 8) сталь из сталеразливочного ковша поступает в промежуточный ковш, а из него в кристаллизатор. В кристаллизаторе образуется твердая корочка - оболочка будущей заготовки, заполненная жидкой сталью. Частично затвердевшая заготовка с помощью транспортирующей системы – тянущей клетки, поступает в зону вторичного охлаждения, где происходит её полное затвердевание. Затвердевшая заготовка режется на мерные длины и с помощью роляганга или других транспортных средств направляются на склад и в прокатный цех.

Разливку ведут до израсходования металла в сталеразливочном ковше или же разливают без перерыва металл из нескольких ковшей (разливка методом «плавка на плавку»).

3.2 Сравнение способов разливки стали в изложницы

Преимущества сифонной разливки перед разливкой сверху:

- 1) одновременная отливка нескольких слитков сокращает длительность разливки плавки и позволяет разливать в мелкие слитки плавки большой массы с меньшими потерями тепла и лучшим качеством слитков по химической неоднородности;
- 2) удобно применять защиту зеркала металла (от вторичного окисления и азотирования) в изложнице шлаковыми смесями;
- 3) поверхность слитка получается чистой, так как металл в изложницах поднимается без разбрызгивания;
- 4) повышается стойкость футеровки ковша и улучшаются условия работы стопора и шиберного затвора вследствие меньшей длительности разливки и уменьшения числа открываний/закрываний;
- 5) есть возможность следить за поведением металла в изложнице и регулировать скорость разливки, что минимизирует вероятность образование продольных трещин на слитке.

Недостатки сифонной разливки:

- 1) сложность и повышенная стоимость разливки из-за расхода сифонного кирпича, установки дополнительного оборудования и затрат труда на сборку поддонов и центровых;
- 2) дополнительные потери металла в виде литников (0,7-2,5 % от массы разливаемой стали) и возможность потерь при прорывах металла через сифонные кирпичи;
- 3) требуется более высокий перегрев металла, заливаемого в центральной литник (на 15-25 °С), чем при разливке сверху, так как металл дополнительно ох-

лаждается в каналах сифонного кирпича;

- 4) повышается вероятность образования дефекта «заворот корки» - затвердевший конгломерат из оксидов и твердого металла на поверхности слитка;
- 5) опасность загрязнения стали неметаллическими включениями из-за размывания сифонного кирпича (есть вероятность забивания каналов или замерзания металла);
- 6) неблагоприятные условия формирования корочки при наполнении изложницы, что ведет к снижению скорости наполнения (в 2-3 раза).

Преимуществами разливки сверху являются:

- 1) более простая подготовка оборудования к разливке и меньшая стоимость/трудоемкость разливки;
- 2) отсутствие расхода металла на литники;
- 3) температура металла перед разливкой может быть ниже, чем при сифонной разливке (ниже требуемый перегрев при сопоставимой продолжительности разливки плавки);
- 4) хорошие условия формирования корочки при наполнении изложницы, что позволяет вести разливку с более высокой скоростью наполнения изложниц.

Недостатки разливки сверху:

- 1) образование плен на поверхности нижней части слитков из-за разбрызгивания металла при ударе струи о дно изложницы. Застывшие на стенках изложницы и окисленные с поверхности брызги металла не растворяются в поднимающейся жидкой стали, образуя дефект поверхности – плены, которые не свариваются с металлом при прокатке. С целью уменьшения напора струи и разбрызгивания металла на стенки изложниц разливку сверху иногда ведут через промежуточные ковши или через промежуточные воронки, изменяют конструкцию нижней части изложницы – сферическое дно или кюмпельный прилив.
- 2) увеличение продолжительность разливки пропорционально снижению массы отливаемых слитков. Иногда при разливке сверху применяют двухсторонние ковши, что позволяет одновременно заполнять две изложницы и сократить длительность разливки (или используют промковши);
- 3) из-за большой длительности разливки снижается стойкость футеровки ковша и в связи с большим числом открываний и закрываний ухудшаются условия работы стопора или шиберного затвора;
- 4) вторичное окисление струи металла с образованием неметаллических включений.

Применяют оба способа разливки в изложницы. Благодаря простоте и отсутствию потерь металла с литниками часто предпочитают разливку сверху. Несмотря на необходимость дополнительной зачистки поверхности проката, разливка сверху для рядовых марок является более экономичной, чем разливка

сифоном. В то же время высококачественные и легированные стали, когда стремятся уменьшить потери дорогостоящего металла на зачистку и получить чистую поверхность слитка, разливают главным образом сифоном. Сифонной разливкой, как правило, получают также слитки массой менее 2,5 т.

3.3 Сравнение разливки стали в изложницы и непрерывной разливки стали

Основные преимущества непрерывной разливки по сравнению с разливкой в изложницы:

1) существенно повышается выход годного металла. Объясняется это тем, что верхняя часть каждого слитка (12-16 % и более) идет при прокатке в обрезь из-за наличия усадочной раковины и зоны обогащенной ликватами, а при непрерывной разливке вследствие постоянной подачи жидкого металла в кристаллизатор и формирования одной непрерывнолитой заготовки образуется одна усадочная раковина в конце разливки плавки, поэтому общие потери с обрезью снижаются до 2-5 %. В итоге, выход годной непрерывнолитой заготовки при непрерывной разливке достигает 95 % и более (при организации «серийной» разливки), а при разливке спокойной стали в изложницы не превышает 85 % (12-16 % головная обрезь и 1-3% донная). Таким образом, для спокойной стали получение слябов или блюмов путем непрерывной разливки вместо разливки в изложницы обеспечивает повышение выхода годного на 10-15 % от массы разливаемой стали.

2) упрощается и сокращается длительность технологического цикла производства, капитальные затраты и оборотные средства. НЛЗ прокатывают непосредственно на листовых или сортовых станах (рисунок 9, а). Применение непрерывной разливки стали позволяет исключить из производственного цикла операции по подготовке разливочного состава, стрипперованию слитков, прокатке на обжимных и заготовочных станах (рисунок 9, б). Все это приводит к снижению капитальных затрат, устранению ряда трудоемких операций, сокращению длительности производственного цикла от выпуска стали до получения готового проката. То есть упрощается производство по заводу в целом и улучшаются его технико-экономические показатели, уменьшаются энергетические затраты, потребность в рабочей силе и площадь завода;

3) вследствие малых поперечных размеров непрерывнолитой заготовки и высокой скорости кристаллизации стали ограничивается развитие ликвации, то есть повышается качество металла, а требуемая величина обжатия снижается. Возможность уменьшения поперечных размеров НЛЗ обеспечивается одновременной отливкой нескольких заготовок (до 8 шт.), что существенно сокращает продолжительность разливки плавки;



Рисунок 9 – Технологическая схема производства стальной заготовки при непрерывной (а) разливке и разливке в изложницы (б)

4) создаются широкие возможности для полной механизации и автоматизации разливки, повышения производительности и улучшения условий труда.

Недостатки непрерывной разливки по сравнению с разливкой в изложницы:

- 1). Более сложное в техническом отношении оборудование, что повышает стоимость его обслуживания;
- 2). Повышенные требования к квалификации обслуживающего персонала;
- 3). Повышенные требования к чистоте разливаемого металла по вредным примесям (содержание серы и фосфора не более 0,015 %) и водороду (до 8 ppm), что связано с повышенными требованиями к прочности затвердевшей корочки;
- 4). Повышенные требования к прочности корочки, формируемой в кристаллизаторе и определяющей условия безаварийной разливки.
- 5). Характерное расположение ликвационных дефектов – преимущественно по оси заготовки, что ведет к неоднородности свойств металла по сечению, и их снижению в сравнении с изделием, получаемым из слитка.

На МНЛЗ, в зависимости от назначения, отливают заготовки квадратного сечения размером до 470x470 мм, круглые диаметром до 600 мм, слябы толщиной до 350 мм и шириной до 2600 мм и более сложный сортамент (полые, круглые заготовки для производства труб, заготовки двутаврового сечения и др.).

3.4 Контрольные вопросы для самопроверки

1. Современные способы разливки стали?
2. Какие варианты технологии применяют для сокращения продолжительности разливки стали в изложницы сверху?
3. Какие варианты технологии применяют при разливке сверху для уменьшения напора струи и разбрызгивания металла на стенки изложниц?
4. Что из себя представляет кристаллизатор МНЛЗ?
5. Какими преимуществами обладает сифонная разливки пред разливкой сверху?
6. Какими преимуществами обладает разливка в изложницы сверху в сравнении с сифонным способом?
7. Что является недостатком разливки в изложницы сверху в сравнении с сифонным способом?
8. Что является недостатком сифонной разливки пред разливкой сверху?
9. Какие варианты технологии применяют для уменьшения пленообразования при разливке стали в изложницы сверху?
10. Какие варианты технологии применяют для недопущения образования дефекта «заворот корки» при разливке сифоном?
11. В чем заключается сущность непрерывной разливки стали?
12. Чем объясняется более высокий выход годной заготовки при непрерывной разливке в сравнении с разливкой в изложницы?
13. Какие преимущества характерны для непрерывной разливки в сравнении с разливкой в изложницы?
14. Какие недостатки характерны для непрерывной разливки в сравнении с разливкой в изложницы?

Тема 4 Закономерности затвердевания НЛЗ, структурная и химическая неоднородность

4.1 Тепловой баланс затвердевания непрерывнолитой заготовки

Превращение жидкой стали в твёрдый полуфабрикат включает в себя отвод следующих количеств тепла:

1. Теплота перегрева, под которой понимается количество тепла, которое получается из разности между температурой ликвидуса стали и температурой стали на входе в кристаллизатор.

2. Теплота фазовых превращений, которая высвобождается при затвердевании и при фазовых превращениях в твёрдом состоянии при дальнейшем охлаждении до температуры поверхности НЛЗ примерно в 1000°C , с которой она выходит из МНЛЗ.

Отвод этих количеств тепла осуществляется излучением, теплопроводностью и конвекцией в трёх зонах охлаждения металла: в зоне кристаллизатора (зона первичного охлаждения), в зоне охлаждения разбрызгиваемой водой, включая роликковое охлаждение, (зона вторичного охлаждения - ЗВО) и в зоне чистого излучения в окружающую среду (зона третичного охлаждения). На участке движения заготовки между кристаллизатором и последним поддерживающим роликом ЗВО теплоотвод представляет собой комбинацию всех трёх видов теплопередачи.

Примерный тепловой баланс охлаждения НЛЗ: кристаллизатор – 15-20 %; ЗВО – 25-30 %; охлаждение на воздухе – 50-60 %. Таким образом, в НЛЗ можно выделить два участка активного охлаждения – кристаллизатор и зону вторичного охлаждения (ЗВО).

4.2 Условия затвердевания непрерывнолитой заготовки в кристаллизаторе

Заливаемый в кристаллизатор металл при контакте с медными водоохлаждаемыми стенками переохлаждается (в результате отвода тепла через медные стенки теплопроводностью) и затвердевает, образуя корку заготовки требуемой конфигурации.

Основная задача, решаемая в кристаллизаторе – это формирование бездефектной корочки с достаточной прочностью, способной противостоять суммарным нагрузкам в корочке от усилия вытягивания и давления жидкой стали с учетом имеющихся в корке термических и фазовых напряжений, а также других механических нагрузок).

Прочность корочки определяется её толщиной (площадью поперечного се-

чения) и пределом прочности стали (σ_v , МПа), зависящей от её химического состава и текущей температуры. Предельное усилие, которое может выдержать корочка без разрушения определяется произведением предела прочности на суммарную площадь сечения, то есть напрямую зависят от толщины корочки.

Суммарная нагрузка, которую должна выдержать корочка НЛЗ, складывается из:

1. усилий вытягивания, определяемых силами трения при контакте НЛЗ со стенками кристаллизатора и сопротивлением роликов ЗВО. Сопротивление роликов (при нормальном обслуживании) минимально, поэтому усилия вытягивания будут определяться условиями контактного трения НЛЗ о стенки кристаллизатора. Силы трения зависят от суммарной площади поверхности трения и коэффициента трения. Коэффициент трения определяется видом материала и условиями смазки, а контактная площадь зависит от активной высоты кристаллизатора и *сечения НЛЗ* (длины периметра);

2. распирающего давления жидкого металла, которое определяется его плотностью и объемом, то есть также зависит от *сечения заготовки* (среднего сечения фронта кристаллизации);

3. термических напряжений в корочке, которые зависят от градиента температур по её толщине и состава металла;

4. фазовых напряжений, определяемых составом металла (температурами фазовых превращений) и текущими температурными условиями;

5. внешних механических напряжений, которые при нормальной настройке роликовой проводки относительно кристаллизатора должны быть минимальными. Они появляются только на вертикально-криволинейных МНЛЗ в зонах изгиба и правки заготовки.

Таким образом, требования к толщине (и, соответственно, прочности) корки повышаются с увеличением площади поперечного сечения заготовки и снижения прочностных свойств стали. Поэтому, в зависимости от сечения НЛЗ, механических свойств стали и конструкции МНЛЗ требования к толщине корки на выходе из кристаллизатора изменяются от 10 до 45 мм и более. Регулирование толщины корочки на выходе из кристаллизатора, согласно закона квадратного корня ($\xi = k\sqrt{\tau / K\phi}$), возможно только путем изменения времени пребывания НЛЗ в кристаллизаторе (τ). В свою очередь время затвердевания заготовки в кристаллизаторе можно увеличить двумя путями:

1. Путем увеличения активной высоты кристаллизатора – высоты кристаллизатора за минусом недолива (обычно 80-120 мм), в пределах которой формируется корочка. Однако при этом увеличивается контактная поверхность между кристаллизатором и НЛЗ, растут усилия вытягивания и требования к прочности корочки. Таким образом, этот путь не обеспечивает решения задачи формиро-

вания корочки необходимой прочности;

2. Путем корректировки скорости вытягивания (W , м/мин).

Именно второй путь достижения заданной толщины и прочности корочки на выходе из кристаллизатора применяют на практике.

Сложность формирования корки требуемой толщины и прочности заключается в изменяющихся по длине кристаллизатора условиях теплоотвода из-за нелинейной динамики роста корочки и усадки НЛЗ.

На расстоянии 0-250 мм от верха кристаллизатора находится зона непосредственного контакта стенок кристаллизатора с коркой НЛЗ. В этой зоне за счет распирающего давления жидкого металла, пластичная и тонкая корочка равномерно прилегает к стенкам кристаллизатора, обеспечивая максимальный теплоотвод ($1,4-2,3 \text{ МВт/м}^2$). Ниже вследствие нелинейности утолщения затвердевшего слоя и, соответственно, усадки металла, между корочкой и стенками кристаллизатора возникает газовый зазор, резко снижающий теплоотвод (до $0,3-0,6 \text{ МВт/м}^2$). На рисунке 10 схематически показано образование газоздушного зазора между оболочкой (корочкой) НЛЗ и стенкой кристаллизатора.



Рисунок 10 – Схема деформации корки НЛЗ при формировании газового зазора

Таким образом, образование газового зазора резко ухудшает условия теплоотвода, замедляя рост корочки, и создавая неравномерные тепловые условия её формирования из-за наличия зон плотного и неплотного контакта корочки со стенками кристаллизатора. Эта неоднородность тепловых условий затвердевания по периметру НЛЗ способствует возникновению дефектов – в местах уменьшенной толщины корки вследствие термических напряжений и механической нагрузки от давления жидкого металла (в зонах изгиба корочки) могут возникать продольные наружные трещины, а в переохлажденных участках плотного контакта – паукообразные или сетчатые поверхностные трещины.

Для создания условий равномерного по периметру (и высоте) теплоотвода необходимо предотвращать образование газового зазора между НЛЗ и кристаллизатором для чего прямолинейные рабочие стенки кристаллизатора устанавливают с обратной конусностью ($0,5-1,5 \%$ на сторону) либо применяют рабочие стенки кристаллизатора сложной формы (3-х плоскостные) или параболической формы, что схематично показано на рисунке 11.

Однако даже усложнение профиля кристаллизатора не обеспечивает устранение газового зазора, поскольку закономерность усадки стали зависит от её химического состава и величины перегрева. Кроме того, изготовление сложного профиля рабочих стенок кристаллизатора существенно увеличивает затраты на разливку. Поэтому на практике используют прямолинейные (или радиальные) кристаллизаторы, а снижение отрицательных последствий образования газового зазора добиваются подбором оптимальной конусности рабочих стенок, а также использования технологии разливки стали под слоем шлакообразующей смеси (ШОС), которая налипая на корочку заготовки заполняет газовый зазор и выравнивает условия теплоотвода. Кроме того, ШОС выполняет и другие положительные функции при разливке, а именно: выполняет роль смазки; защищает зеркало металла от вторичного окисления; поглощает всплывающие неметаллические включения. Необходимым условием затягивания ШОС между НЛЗ и кристаллизатором является осуществление качания кристаллизатора при помощи механизма качания. При возвратно поступательном движении кристаллизатора, кроме затягивания ШОС, обеспечивается снижение коэффициента трения (из-за повышения скорости взаимного скольжения), предотвращается приваривание НЛЗ к стенкам кристаллизатора, а также ускоряется залечивание разрывов корочки. В итоге, качание кристаллизатора является обязательным элементом современной технологии непрерывной разливки, обеспечивающим благоприятные условия формирования корочки и снижение износа рабочих стенок кристаллизатора.

Температура поверхности НЛЗ на выходе из кристаллизатора обычно составляет 1150-1300 °С.

4.3 Условия затвердевания в зоне вторичного охлаждения

Задачи, решаемые в ЗВО:

- полное затвердевание НЛЗ в пределах ЗВО;
- создание условий затвердевания с минимальными напряжениями в затвердевшем слое во избежание образования поверхностных и внутренних трещин;
- сохранение температуры металла в ЗВО в пределах пластического со-

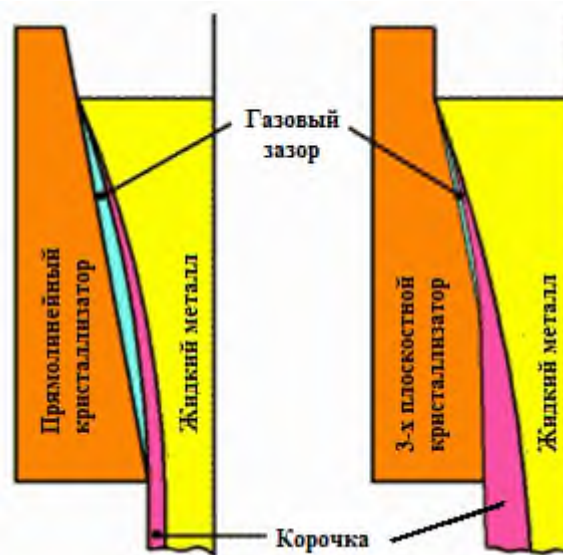


Рисунок 11 – Схема устранения газового зазора в кристаллизаторе

стояния;

- предотвращение раздутия корочки НЛЗ;
- обеспечение заданной траектории и скорости движения НЛЗ.

Для выполнения этих задач в ЗВО на поверхность движущейся НЛЗ подают распыленную воду, а траектория движения НЛЗ и предотвращение «раздутия» корки под воздействием давления столба жидкой стали обеспечивается поддерживающими роликами. Исходя из этого теплоотвод от НЛЗ осуществляется излучением, испарением воды, конвекцией и теплопроводностью (от ролика). Примерно 50-55% тепла, отводимого от НЛЗ в ЗВО, передается подаваемой форсунками воде, приблизительно 40% поддерживающим роликам с внутренним охлаждением и 5-10% отводится вследствие лучеиспускания и конвекции в окружающую среду. Температурные условия на поверхности НЛЗ в ЗВО проиллюстрированы на рисунке 12

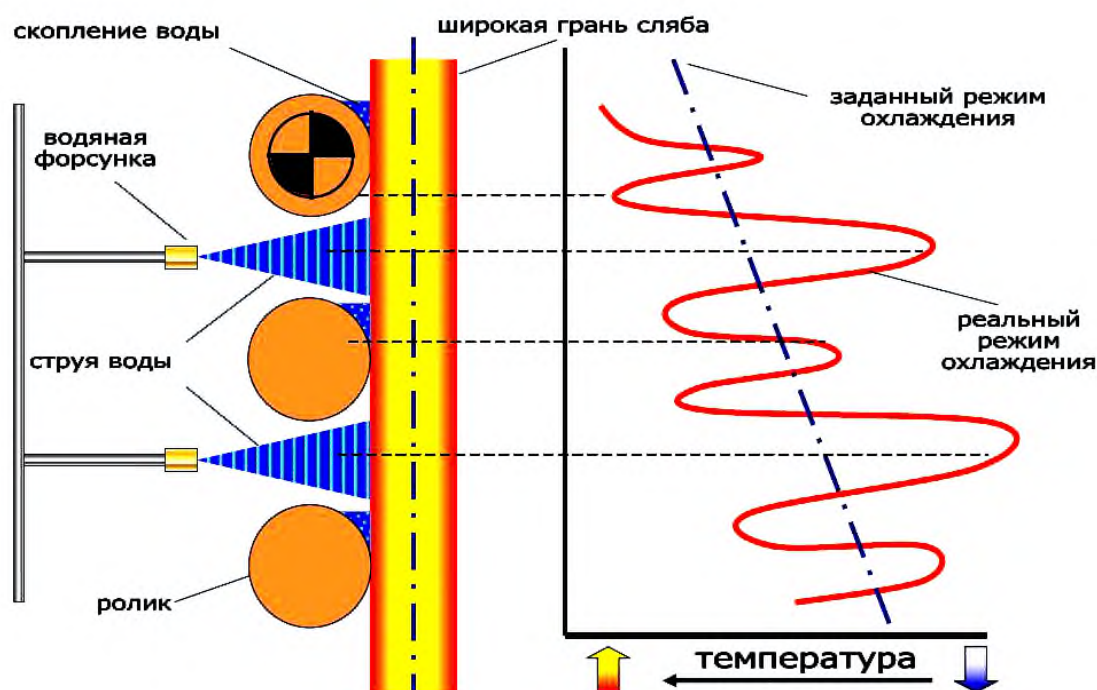


Рисунок 12 - Температурные условия затвердевания заготовки в ЗВО

Из рисунка 12 следует, что условия теплоотвода в ЗВО неравномерные по длине заготовки:

- наиболее интенсивная зона теплоотвода в области прямого действия форсунки;
- зона минимального теплоотвода непосредственно под роликом, где наблюдается разогрев корочки;
- дополнительное охлаждение поверхности заготовки в зоне скопления воды и контакта с роликом.

Интенсивность охлаждения в ЗВО должна выбираться таким образом, чтобы температура поверхности заготовки в процессе ее перемещения по ней оста-

ввалась примерно постоянной или медленно уменьшалась. Достаточно часто предпочтение отдается варианту, при котором температура поверхности медленно снижается по всей длине ЗВО. Наиболее неблагоприятными условиями охлаждения являются колебания температуры заготовки в области температуры аустенитного превращения, поскольку они провоцируют возникновение горячих поверхностных трещин.

Для минимизации термических напряжений по толщине корки и длине заготовки, необходимо подавать тонкораспыленную воду («мягкое охлаждение») с равномерным расходом по периметру НЛЗ, а по длине заготовки расход воды плавно снижать (во избежание переохлаждения поверхности заготовки и возникновения на поверхности и в глубине затвердевшей корочки термических напряжений, приводящих к образованию трещин – как поверхностных, так и внутренних). Для этого расход воды уменьшается по мере отдаления от кристаллизатора таким образом, чтобы отводилось тепло, выделяющееся при кристаллизации стали, а температура корки во избежание образования трещин снижалась бы от исходной (1150-1300 °С на выходе из кристаллизатора) не более, чем до 900-1050 °С (на 30-50 °С выше температуры потери пластичности) в конце, причем в тем меньшей степени, чем выше склонность стали к трещинообразованию.

На рисунке 13 показана форма расчетных кривых охлаждения слябовой заготовки 270x1240 мм, отливаемой со скоростью 1,1 м/мин на МНЛЗ №2 ЭСПЦ АО «Уральская сталь». Так, температура поверхности заготовки снижается от 1150°С на входе в ЗВО до 925°С на расстоянии 30 метров от уровня металла в кристаллизаторе (выход из ЗВО). При этом значения амплитуды колебаний температуры поверхности НЛЗ могут достигать 150°С в верхних и 70°С в нижних зонах охлаждения.

Длина зоны вторичного охлаждения при заданной скорости вытягивания заготовки должна обеспечивать полное затвердевание НЛЗ. То есть металлургическая длина МНЛЗ, складывающаяся из активной длины кристаллизатора (за минусом недолива) и ЗВО, должна оставлять не менее 90-100 % глубины лунки жидкого металла (расстояние по длине НЛЗ от уровня металла в кристаллизаторе до момента полного затвердевания заготовки). Поскольку глубина лунки жидкого металла определяется длительностью затвердевания заготовки и скоростью её вытягивания, то для выполнения этого условия на действующих МНЛЗ, существует предельная скорость вытягивания.

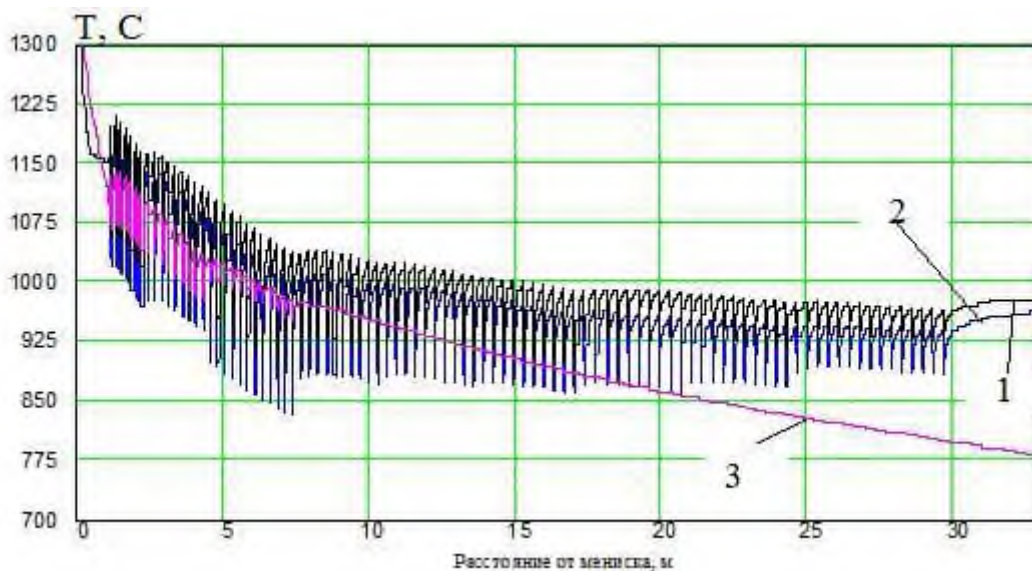


Рисунок 13 – Динамика температуры середины широкой грани (1), на расстоянии $\frac{1}{4}$ от центра (2) и угла (3) при разливке сляба 270x1200 мм со скоростью 1,1 м/мин на МНЛЗ №2 ЭСПЦ АО «Уральская сталь»

Таким образом, скорость вытягивания заготовки подбирается из условия формирования достаточно прочной корочки в кристаллизаторе и обеспечения полного затвердевания заготовки в пределах металлургической длины МНЛЗ (расстояние от уровня металла в кристаллизаторе до середины последнего ролика ЗВО).

4.4 Химическая неоднородность НЛЗ

Жидкая сталь представляет собой однородный раствор углерода, кремния, марганца, фосфора, серы, кислорода и газов в жидком железе, но содержание этих примесей в различных точках стального слитка/заготовки неодинаково. Химическая неоднородность, или ликвация, возникает при затвердевании металла.

Причиной возникновения ликвации является то, что растворимость ряда примесей (в первую очередь, серы, фосфора и углерода) в твердом железе ниже, чем в жидком. Вследствие этого растущие при затвердевании оси кристаллов содержат меньшее количество примесей, чем исходная сталь (процесс «избирательной кристаллизации»), а остающийся жидкий металл обогащается примесями.

Склонность к ликвации различных элементов, содержащихся в стали, неодинакова. Степень ликвации обычно характеризуют следующим выражением:

$$\frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\text{ж}}} 100\% ,$$

где C – максимальное, минимальное и среднее содержание элемента в той или иной части слитка/заготовки.

Различают ликвацию двух видов: дендритную и зональную.

Дендритная ликвация – это неоднородность стали в пределах одного кристалла (дендрита): содержание примеси в осях дендритов ниже, чем в межосных объемах и по границам кристалла. Наибольшей склонностью к дендритной ликвации обладают сера, фосфор и углерод. В меньшей степени: кремний, марганец, вольфрам, хром, молибден и ряд других элементов. Степень дендритной ликвации, т.е. различие между содержанием отдельных элементов в осях и межосных пространствах дендритов достигает в НЛЗ до 50 % по сере и фосфору и до 20 % по углероду.

Отрицательное влияние дендритной ликвации проявляется в том, что она вызывает появление в прокате полосчатой структуры: при прокатке оси дендритов и межосные участки вытягиваются, образуя волокна (полосы), обладающие неодинаковым составом и свойствами. Эта *структурная полосчатость*, а также вытягивающиеся вдоль волокон неметаллические включения, вызывают анизотропию механических свойств металла в продольном и поперечном относительно оси прокатки направлениях: пластические свойства стали в поперечном направлении оказываются более низкими, чем в продольном.

Зональная ликвация – это неоднородность состава стали в различных частях заготовки. К образованию зональной ликвации склонны сера, фосфор, углерод и кислород. Характерной особенностью проявления зональной ликвации в непрерывнолитой заготовке является максимальное скопление ликватов в осевой части, что называют **осевой химической неоднородностью**. Степень зональной ликвации НЛЗ увеличивается с увеличением продолжительности затвердевания заготовки (сечения заготовки), достигая до 100 % по сере и фосфору и до 30 % по углероду. Зональной же ликвации других примесей стали практически не наблюдается.

Зональная ликвация вызывает неоднородность свойств в различных частях стальных изделий и может вызывать отбраковку металла вследствие отклонения состава металла от заданного.

В возникновении зональной неоднородности наряду с избирательной кристаллизацией важную роль играют процессы, приводящие к перемещению ликвирующих элементов из одной части заготовки в другую. Такими процессами являются:

1. диффузия примесей из двухфазной области в объем оставшегося жидкого металла;
2. конвективные потоки металла в незатвердевшей части заготовки, приводящие к выносу ликватов с фронта кристаллизации в центральную часть.

3. потоки металла, вызванные «кипением» (газовыделением) при затвердевании.

Поскольку развитие зональной ликвации связано с вытеснением ликватов с фронта кристаллизации в осевую части заготовки, то в промежуточной части НЛЗ наблюдается отрицательная ликвация (содержание ликватов ниже среднего), а в центральной – положительная (содержание ликватов выше среднего). Поскольку ликвации подвержены, в первую очередь, вредные примеси, такие как сера и фосфор, но наибольшую опасность представляет положительная осевая ликвация.

Учитывая, что осевая ликвация развивается в течение затвердевания НЛЗ и её развитие пропорционально продолжительности затвердевания, то особую опасность она представляет для крупных сечений непрерывнолитых заготовок. Поскольку этот дефект практически не устраняется, то снижению его развития способствует:

1. уменьшение длительности затвердевания путем уменьшения толщины НЛЗ и повышения интенсивности её охлаждения;
2. снижения концентрации ликватов (S и P) до уровня в 2-3 раза менее требуемого (этим отчасти объясняется ужесточение современных требований к уровню серы и фосфора в стали до 0,010 % и менее).

4.5 Особенности структуры и химической неоднородности в НЛЗ

Особенности строения НЛЗ из спокойной стали.

Образование структурных зон в непрерывнолитой заготовке, как и в слитке, отлитом в изложницу, определяется в основном составом и температурой стали. В поперечном сечении НЛЗ из спокойной стали также наблюдаются (рисунок 14) структурные зоны наружных мелкозернистых (1), столбчатых (2) и различно ориентированных крупных равноосных кристаллов в центральной части (3).

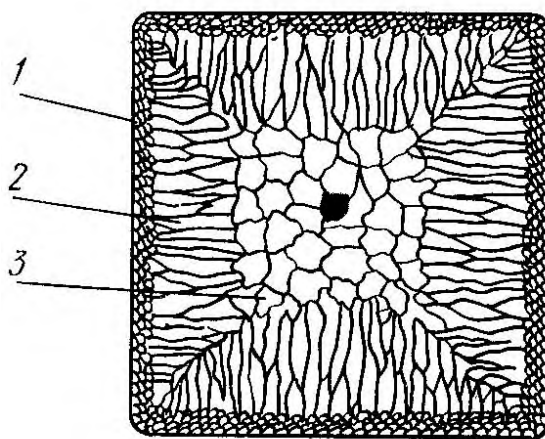


Рисунок 14 – Макроструктура поперечного сечения НЛЗ спокойной стали

Отличительной особенностью макроструктуры НЛЗ является наличие усадочной пористости (рыхлости) в осевой части заготовки по всей её длине. Этот дефект НЛЗ, называют осевой рыхлостью (пористостью).

Появление осевой рыхлости связано с естественной усадкой стали и затруднением поступления жидкого металла в осевую часть заготовки в конце затвердевания (из-за протяженность жидкой лунки и повышенной вязкости переохлажденного металла). Величина объемной усадки стали при затвердевании, влияющая на развитие осевой пористости, определяется величиной интервала кристаллизации и для сталей различных марок (в первую очередь по содержания углерода) может составлять 3-5 %.

Химическая неоднородность в НЛЗ развивается в меньшей степени, чем в слитке, отливом в изложницу. Это справедливо как для дендритной, так и для зональной ликвации. При повышенной скорости кристаллизации разделительная диффузия примеси проходит менее полно и, соответственно, меньшей оказывается и разница концентраций примесей в осях дендритов и межосных участках, а также ликвация по сечению заготовки. Например, в осевой зоне НЛЗ толщиной до 150-200 мм степень положительной ликвации примесей достигала значений, %: для углерода до 20, для серы и фосфора до 50, а с увеличением толщины НЛЗ до 300 мм – степень ликвации по сере и фосфору повышается до 100 %.

Особенности разлива и формирования НЛЗ кипящей стали. В отличие от слитка, разлитого в изложницы, НЛЗ кипящей стали формируется в условиях более интенсивного охлаждения, быстрого нарастания ферростатического напора, большей глубины жидкой лунки, сравнительно малого поперечного сечения кристаллизатора и его циклического движения и т. п. Эти факторы затрудняют кипение стали и осложняют разливку.

В поперечном сечении НЛЗ кипящей стали можно выделить здоровую корочку (ЗК), зону сотовых пузырей и центральную зону. Здоровая корочка и часть зоны сотовых пузырей формируется еще в кристаллизаторе. Толщина здоровой корочки определяется так же, как и в обычном слитке, интенсивностью и продолжительностью кипения. Она увеличивается с уменьшением скорости разлива и повышением окисленности стали. С учетом глубины прокипания металла 1 м (при обычной степени окисленности стали), толщина здоровой корочки может достигать 20-25 мм при скорости разлива 0,7 м/мин. Но требования к толщине ЗК определяются уже не нагревом под прокатку, а требованиями к её прочности (требуемая толщина безпузыристой корочки зависит от сечения слитка, с увеличением которого расчет ферростатическое давление на корочку), поэтому скорость вытягивания подбирается исходя из достижения ЗК требуемой толщины и прочности на выходе из кристаллизатора, а формирование сотовых пузырей начинается уже в зоне вторичного охлаждения. По мере

возрастания ферростатического давления их рост прекращается (термодинамическое «закупоривание»). Их протяженность зависит от условий газовыделения, то есть окисленности стали и скорости разливки. Рост сотовых пузырей прекращается под действием ферростатического давления при уровне вышележащего металла 2,5-3,0 м. Общая протяженность здоровой корочки и зоны сотовых пузырей в стали с 0,17-0,22 % С при толщине заготовки 150-200 мм (скорость вытягивания 0,5-1 м/мин) составляет 35-55 мм.

Центральная зона НЛЗ затвердевает в условиях повышенного ферростатического давления и обычно не содержит пузырей, а только осевые усадочные пустоты.

В НЛЗ кипящей стали химическая неоднородность развита меньше, чем в обычном слитке, но больше, чем в НЛЗ спокойной стали. Скопление ликватов – серы, фосфора и углерода – имеет место в конце зоны сотовых пузырей и в осевой зоне НЛЗ. В осевой части НЛЗ толщиной 250-300 мм ликвация по сере может достигать 200 %, по фосфору – до 100 % и по углероду – до 50 %. Значительная величина степени ликвации вредных примесей в осевой части НЛЗ кипящей стали резко повышает анизотропию свойств в изделии. Однако удаление осевой части металла затруднительно (в отличие от головной обрезки слитка) – это является одной из главных причин отказа от непрерывной разливки кипящих сталей.

Особенности разливки и формирования НЛЗ полуспокойной стали.

При разливке полуспокойной стали наблюдается незначительное газовыделение, а глубина «прокипания» металла обычно составляет до 0,25-0,30 м. Поэтому, при непрерывной разливке полуспокойной стали в формирующейся корочке НЛЗ на уровне от мениска до 0,3 м уровня металла в кристаллизаторе появляются «подкорковые» пузыри, существенно снижающие прочность корочки. Это вынуждает снижать скорость разливки и означает падение производительности МНЛЗ (при разливке полуспокойной стали в изложницы такая проблема отсутствует, а для подавления образования подкорковых пузырей, сталь в изложницы разливают с максимальной скоростью). Кроме того, при разливке полуспокойной стали осложняется регулирование окисленности.

Таким образом, разливка частично раскисленной кипящей и полуспокойной стали непрерывным способом связано со следующими недостатками:

1. высокая степень осевой химической неоднородности;
2. сложности в формировании достаточно прочной беспузыристой корочки;
3. пониженный коэффициент затвердевания стали, что снижает допустимую скорость вытягивания.

Кроме того, при разливке кипящей и полуспокойной стали невозможно использованием ШОС и осложнена подача смазки на стенки кристаллизатора,

что ухудшает условия затвердевания стали в кристаллизаторе и повышает усилия вытягивания.

По этим причинам, частично раскисленную сталь (кипящая и полуспокойная) непрерывным способом не разливают. При этом на МНЛЗ разливают стали с маркировкой кипящих и полуспокойных сталей, однако это относится только к содержанию в них марганца и кремния, поскольку подавление активности кислорода в них (раскисление) проводят алюминием. Поэтому, несмотря на то, что по маркировке эти стали (например, 08кп или 08пс) относятся к кипящим и полуспокойным, фактически по содержанию кислорода и поведению в процессе затвердевания они соответствуют спокойным сталям.

4.6 Контрольные вопросы для самопроверки

1. Какая доля внутреннего тепла заготовки отводится в кристаллизаторе?
2. Какая доля внутреннего тепла заготовки отводится в зоне вторичного охлаждения?
3. Какая основная задача, решаемая в кристаллизаторе?
4. От каких двух параметров зависит прочность затвердевшей корочки?
5. Какие факторы оказывают влияние на требования к прочности корочки при непрерывной разливке?
6. Каким путем целесообразно добиваться формирования корочки заданной толщины на выходе из кристаллизатора?
7. Как следует изменить скорость вытягивания для увеличения толщины корочки на выходе из кристаллизатора?
8. Укажите вид (виды) теплопередачи при затвердевании заготовки в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения.
9. Что является главным фактором, определяющим требование к толщине затвердевшей корочки на выходе из кристаллизатора?
10. Укажите основную проблему, возникающую при затвердевании металла в кристаллизаторе.
11. Укажите наиболее общую формулировку причин образования трещин в непрерывнолитой заготовке.
12. С какой целью применяют шлакообразующие смеси в кристаллизаторе?
13. Укажите способы стабилизации тепловых условий затвердевания заготовки в кристаллизаторе.
14. Для чего кристаллизатору сообщают возвратно-поступательные движения (качание)?
15. Как изменяется температура поверхности непрерывнолитой заготовки в процессе разливки?
16. Какие задачи решаются при затвердевании заготовки в зоне вторичного ох-

лаждения?

17. Какие задачи ЗВО решаются с помощью поддерживающих роликов?

18. За счет чего обеспечивается отвод тепла от заготовки в зоне вторичного охлаждения?

19. В какой зоне по длине заготовки обеспечивается максимальная скорость теплоотвода?

20. Какие требования предъявляют к температуре поверхности заготовки в зоне вторичного охлаждения?

21. Какая амплитуда колебаний температуры поверхности заготовки наблюдаются на практике в зоне вторичного охлаждения и почему?

22. Что такое металлургическая длина МНЛЗ?

23. Какими факторами определяется максимально допустимая скорость вытягивания заготовки?

24. Что такое глубина лунки жидкого металла и от чего она зависит?

25. Что такое дендритная ликвация и каковы причины её возникновения?

26. В чем выражается отрицательное влияние дендритной ликвации?

27. Что такое зональная ликвация и в чем причины её возникновения?

28. Укажите характерную особенность проявления зональной ликвации в непрерывнолитой заготовке.

29. Укажите способы снижения развития химической неоднородности при разливке.

30. Что такое осевая рыхлость и каковы причины её образования?

31. Что такое осевая химическая неоднородность?

Тема 5 Классификация и устройство МНЛЗ

5.1 Классификация МНЛЗ

В настоящее время в эксплуатации находится большое разнообразие установок непрерывной разливки стали. Это обусловлено требованиями к сортаменту и качеству заготовок и производительности МНЛЗ. Все эти разновидности установок классифицируются по следующим признаками.

По типу заготовки МНЛЗ различаются на слябовые, блюмовые и сортовые. Заготовки, отливаемые на слябовых машинах, имеют форму поперечного сечения в виде прямоугольника с соотношением длинной стороны к короткой > 3 . На блюмовых и сортовых МНЛЗ отливают заготовки в виде круга, квадрата или прямоугольника с меньшим отношением сторон. Заготовки с размером стороны > 200 мм обычно называются блюмами, с меньшим размером – сортовыми заготовками.

По принципу работы различают машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и полунепрерывного литья (МПНЛЗ). МНЛЗ оснащают устройствами для быстрой замены сталеразливочного ковша и механизмами резки НЛЗ на мерные длины, что позволяет разливать плавки сериями методом «плавка на плавку». МПНЛЗ предназначены для непрерывной разливки разовой порции металла (плавки), поэтому она проще по конструкции (нет устройств для замены сталковша и промковша), а длина заготовки определяется её сечением и массой плавки, исходя из которых рассчитывается ход механизма вытягивания.

По составу различают одно- и многоручьевые МНЛЗ. Ручьем называют систему механизмов и узлов, включая кристаллизатор, предназначенных для формирования непрерывнолитой заготовки. Увеличение производительности МНЛЗ достигается разливкой металла из сталеразливочного ковша в несколько кристаллизаторов, то есть путем одновременного формирования нескольких НЛЗ. С учетом пропускной способности одного ручья при разливке блюмовой/сортовой заготовки, количество ручьев на блюмовых/сортовых МНЛЗ составляет от 4-х до 8-ми. На слябовых МНЛЗ той же производительности количество ручьев обычно 1-2 шт, а максимальное количество достигает 4-х шт.

По расположению основной технологической оси МНЛЗ (направления движения отливаемой заготовки) различают (рисунок 15) машины вертикального типа (1), вертикальные с изгибом затвердевшей заготовки (2) вертикально-радиальные и вертикально-криволинейные (3), радиальные (4), криволинейные (5) и горизонтальные (6).

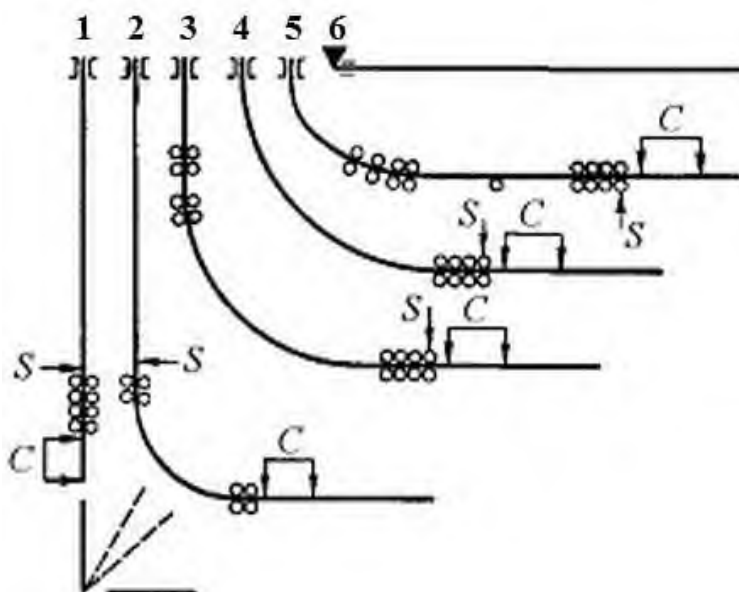
По характеру движения кристаллизатора различаются следующие типы МНЛЗ:

- с неподвижным кристаллизатором, к которым относится горизонтальная

МНЛЗ;

– с качающимся кристаллизатором, совершающим возвратно-поступательные движения в направлении вытягивания заготовки по определенному закону: движение кристаллизатора вниз осуществляется с некоторым опережением заготовки, а вверх – с максимальной скоростью, обеспечиваемой механизмом качания. К этому типу машин относится основное количество установок непрерывной разливки стали;

– с кристаллизатором,двигающимся со скоростью заготовки; это обеспечивает отсутствие скольжения оболочки НЛЗ относительно кристаллизатора и, следовательно, трения между ними, что снижает вероятность разрыва оболочки при высоких скоростях разливки.



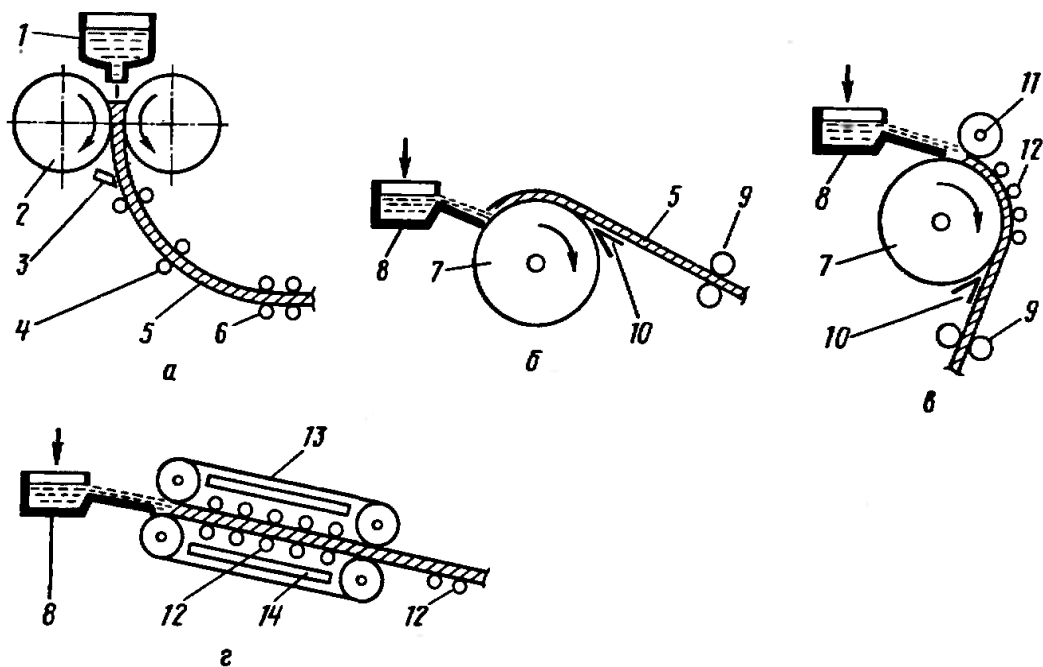
С – зона порезки заготовки; S – конец затвердевания

Рисунок 15 – Виды МНЛЗ по расположению технологической оси

МНЛЗ без скольжения заготовки в кристаллизаторе начали применять для разливки стали в последние годы. Отсутствие скольжения обеспечивается за счет совместного движения поверхности кристаллизатора и литой заготовки в начале её формирования, что достигается подачей жидкого металла на движущуюся охлаждаемую поверхность, выполняющую роль кристаллизатора.

Основные разновидности МНЛЗ подобного типа представлены на рисунке 16.

Наибольшее распространение получили двухвалковые машины непрерывного литья полосы (МНЛП), в которых металл подают в зазор между двумя вращающимися валками. МНЛП подобного типа применяют для отливки полос и лент толщиной менее 10-20 мм и шириной до 800-1000 мм.



а – двухвалковая; *б* – барабанного типа без ограничительного ролика;
в – барабанного типа с ограничительным роликом; *г* – двухленточная:

1 – промежуточный ковш; 2 – охлаждаемый валок; 3 – изгибающее устройство;
 4 – направляющие ролики; 5 – заготовка (полоса); 6 – выпрямляющие ролики;
 7 – охлаждаемый барабан; 8 – желоб; 9 – тянущие валки; 10 – снимающий клин;
 11 – ограничительный ролик; 12 – опорные ролики; 13 – лента;
 14 – охладитель ленты

Рисунок 16 – МНЛЗ без скольжения заготовки в кристаллизаторе

Благодаря отсутствию трения между заготовкой и кристаллизатором скорость движения отливаемой полосы на таких машинах значительно выше, чем на классических МНЛЗ с вытягиванием заготовки из кристаллизатора: при отливке полос и лент толщиной менее 1-2 мм эта скорость может достигать 100-150 м/мин и более.

5.2 Основные узлы МНЛЗ. Оборудование для быстрой смены ковшей

Основной технологической функцией любой МНЛЗ является перевод стали из жидкого состояния в твердое с приданием получаемой заготовке определенной геометрической формы и обеспечением качественных показателей ее поверхности и внутренней структуры, регламентируемых соответствующими техническими условиями.

Общая схема разливки стали с обозначением основных функциональных узлов и механизмов представлена на рисунке 17.

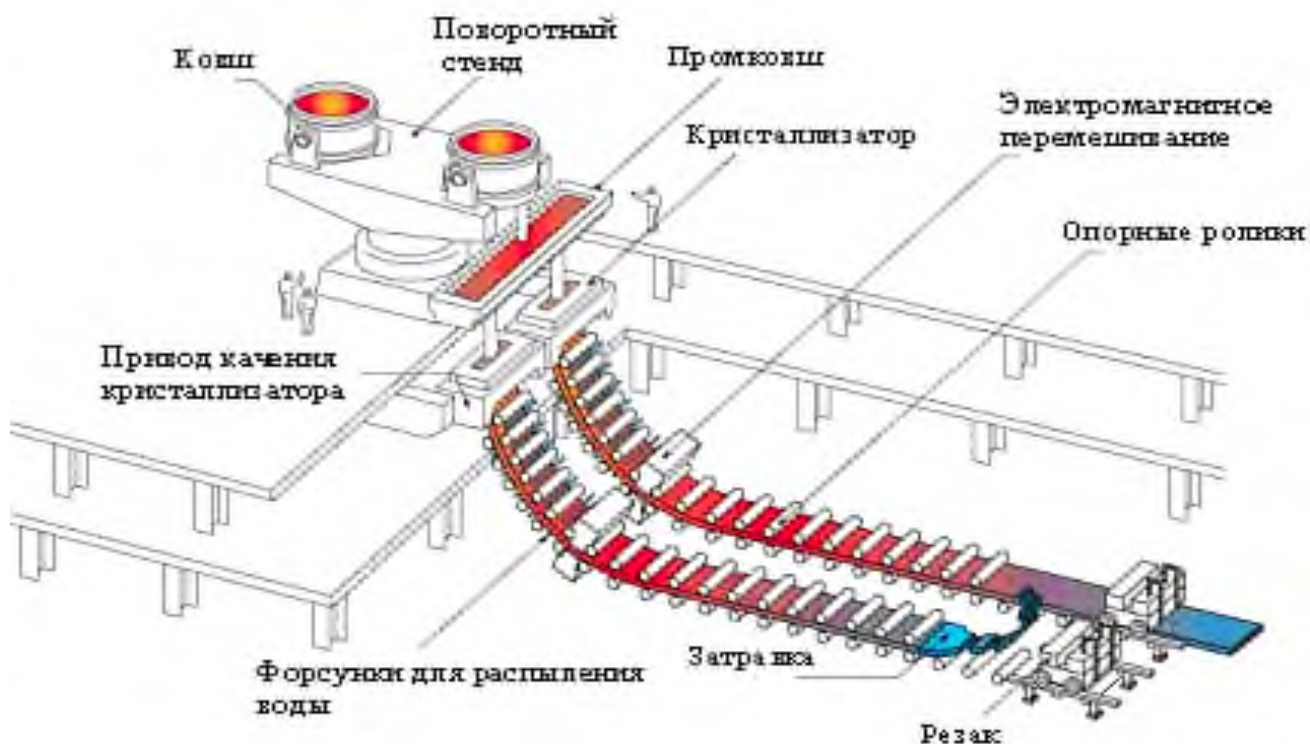


Рисунок 17 – Общая схема разливки стали на МНЛЗ

Современная МНЛЗ состоит из следующих основных элементов: сталеразливочного станда; промежуточного ковша (с тележкой или стандом перемещения и установки в рабочее положение); кристаллизатора; механизма качания кристаллизатора; зоны вторичного охлаждения (ЗВО) с поддерживающими устройствами; затравки (с механизмом для ввода и уборки затравки); устройств для резки НЛЗ на мерной длины.

5.3 Оборудование для быстрой смены ковшей

Современные МНЛЗ оборудуют поворотными и иногда передвижными стандами, которые обеспечивают подачу ковшей с металлом к машине, взвешивание и установку ковша со скоростями, позволяющими вести разливку методом «плавка на плавку». Задачами станда сталеразливочных ковшей являются:

- быстрое перемещение (30-40 с) сталеразливочного ковша из резервной позиции в рабочую для проведения серийной разливки методом «плавка на плавку»;
- подъем/опускание ковша на высоту (0,8-1,0 м), достаточную для проведения технологических операций (прожигание отверстия в канале стакан-коллектора сталеразливочного ковша, установки и замены защитных труб на участке «стальковш-промковш»);
- непрерывное взвешивание стальковша;

– аварийное перемещения ковша в позицию для слива стали в аварийную емкость.

Стенды бывают передвижными и подъемно-поворотными (рисунок 18). Передвижные стенды (портальные, полупортальные, мостовые) имеют механизм для передвижения по рельсам и механизм подъема-опускания ковшей с системой их взвешивания. В современных МНЛЗ такие конструкции практически не применяются из-за громоздкости и необходимости наличия двух стендов для осуществления серийной разливки.



а)



б)

Рисунок 18 – Передвижные (а) и подъемно-поворотные (б) сталеразливочные стенды

Наиболее широко распространены стенды поворотного типа, которые состоят из опорных элементов, поворотных частей с приводом подъема ковшей и поворота, а также приспособлений для взвешивания ковшей. При разливке методом «плавка на плавку» из ковша в рабочей позиции металл выдается в промежуточный ковш. Заранее до опорожнения ковша в резервную позицию на стенд устанавливается полный ковш с металлом следующей плавки. После опорожнения ковша осуществляется поворот из резервной позиции в рабочую, после чего разливка продолжается из нового полного ковша. Замена сталеразливочного ковша не изменяет скорости процесса, т.к. в промежуточном ковше находится достаточное количество жидкого металла для продолжения разливки.

5.4 Промежуточный ковш МНЛЗ

Промежуточный ковш является одним из важнейших технологических элементов при разливке стали на МНЛЗ, поскольку находясь между сталеразливочным ковшом и кристаллизатором, обеспечивает поддержание постоянного и небольшого напора струи металла, поступающего в кристаллизатор МНЛЗ, без чего невозможно стабильное затвердевание заготовки. К функциям проме-

жуточного ковша относится:

- поддержание постоянного по ходу разливки и небольшого напора струи металла, поступающего в кристаллизатор (за счет поддержания в ковше постоянного уровня металла высотой 0,80-1,25 м);

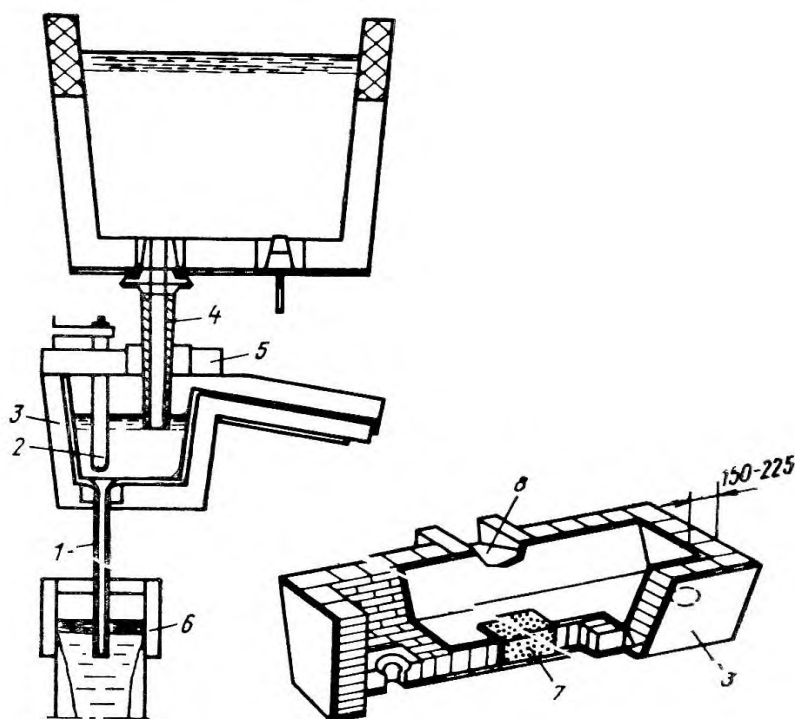
- регулирование скорости подачи металла в кристаллизатор (с помощью стопорных устройств);

- распределение металла по нескольким кристаллизаторам на многоручьевых МНЛЗ;

- серийная разливка методом «плавка на плавку» (запас металла в промежуточном ковше позволяет продолжать разливку в периоды, когда опорожненный сталеразливочный ковш заменяют новым – в течение 3-5 мин);

- корректировка температуры, модифицирование стали, дополнительное рафинирование от неметаллических включения и газов.

Промежуточный ковш выполняется сварным (рисунок 19) из стальных листов, футерованным огнеупорными материалами. Для уменьшения тепловых потерь он снабжен крышкой, футерованной кирпичом или набивной массой.



1 – погружной стакан; 2 – стопор; 3 – промежуточный ковш; 4 – защитная труба; 5 – крышка; 6 – кристаллизатор; 7 – участок струи (бойное место); 8 – сливной носок (желоб)

Рисунок 19 – Устройство промежуточного ковша

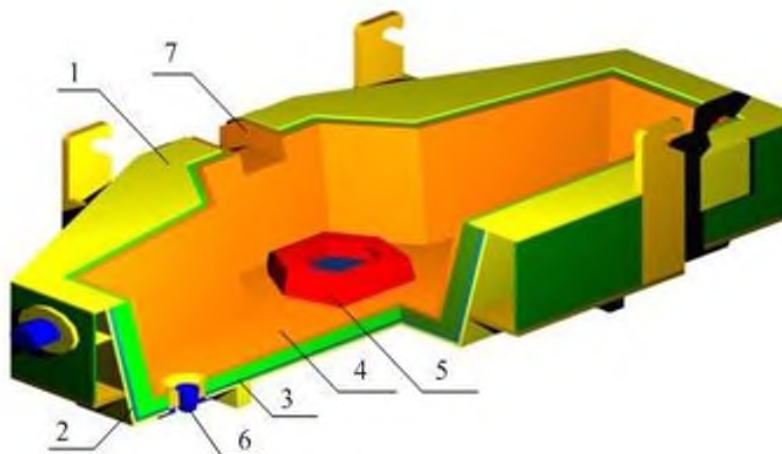
Промежуточный ковш устанавливается на специальный подъемно-поворотный стенд или тележку, которые обеспечивают его перемещение из резервной позиции в рабочую и обратно, а также подъем над кристаллизатором для

установки сталеразливочного стакана, обслуживания кристаллизатора и поддержания процесса разливки в заданном режиме.

При разливке стали длинными сериями в случае износа футеровки (или переходе на разливку другой марки стали) осуществляется замена промковша на новый, который подается другой транспортной тележкой.

Вместимость промковша должна обеспечивать отсутствие снижения скорости разливки во время замены сталеразливочного ковша и возможность удаления части неметаллических включений. В зависимости от производительности МНЛЗ вместимость промковшей может составлять 25-55 т, иногда она достигает 90 т. Высота металла в промковше – 800-1250 мм. При низком уровне зеркала металла может происходить затягивание шлака в разливочный стакан и кристаллизатор, что недопустимо из-за загрязнения НЛЗ шлаковыми включениями. Критическое значение уровня металла в промковше составляет 400 мм

Промежуточный ковш может футероваться штучными огнеупорными материалами или иметь монолитную футеровку. Она состоит из трех слоев: теплоизоляционного, арматурного и рабочего слоя (рисунок 20).



- 1 – стальной кожух; 2 – теплоизоляционный слой; 3 – арматурный слой;
4 – рабочий слой; 5 – металлоприемник; 6 – разливочный стакан-дозатор;
7 – сливной носок

Рисунок 20 – Основные элементы футеровки промковша

Теплоизоляционный слой снижает тепловые потери и выполняется из листового асбеста. Арматурный слой защищает металлический корпус от температурных деформаций и воздействия жидкого металла и выполняется обычно из шамотного кирпича. Рабочий слой, обладающий повышенной износостойкостью, может выполняться из шамотного, высокоглиноземистого или периклазового кирпича (периклазо-углеродистого). В среднем расход огнеупоров промковша составляет 2,5-3,5 кг/т разливаемой стали. Для увеличения стойкости футеровка рабочего слоя может подвергаться торкретированию или может быть покрыта защитным слоем. В последнее время активно применяются монолит-

ные футеровки из огнеупорного бетона, что значительно дороже, но это компенсируется более высокой стойкостью. Перед началом разливки осуществляется подогрев футеровки газовыми горелками до температуры не менее 1200 °С.

Для предотвращения размывания футеровки проковша в месте падения струи металла из стальковша, так называемое «бойное место» футеруется из более качественных огнеупоров или в этом месте устанавливают приемное устройство – металлоприемник (поз. 5 на рисунке 20), который выполняется из специальных высокопрочных огнеупорных материалов и имеют геометрическую форму типа «стакан» (рисунок 21).

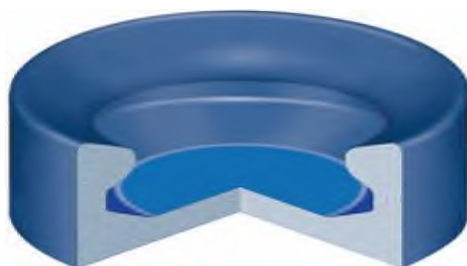
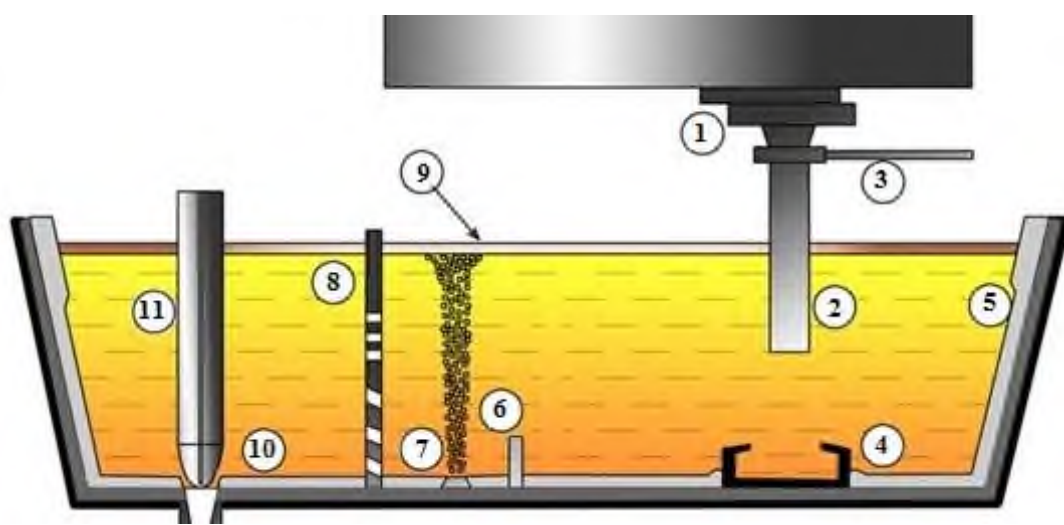


Рисунок 21 – Металлоприемник промежуточного ковша

Функционал промежуточного ковша по дополнительному рафинированию от неметаллических включений реализуется в результате формирования упорядоченных потоков жидкого металла за счет установки порогов и перегородок (с каналами), а также организации газовой завесы (на пути потока металла) путем установки продувочных блоков (рисунок 22). Последнее мероприятие способствует также удалению растворенных газов.



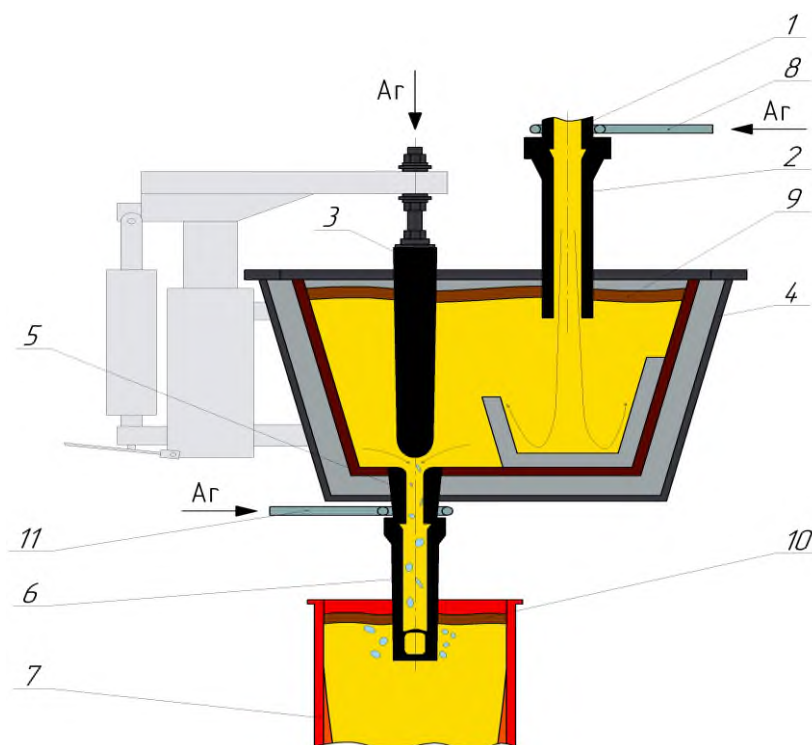
- 1 – стальковш; 2 – защитная труба с подачей аргона (3); 4 – металлоприемник;
 5 – футеровка; 6 – порог; 7 – продувочный блок; 8 – перегородка;
 9 – покровный шлак; 10 – жидкая сталь; 11 – стопор

Рисунок 22 – Схема расположения дополнительных элементов в проковше

Для обеспечения стабильного температурного режима разливки на практике могут использовать дополнительный (корректирующий) подогрев металла в проковше, что позволяет поддерживать температуру на заданном уровне (10-25 °С выше температуры ликвидус). Подогрев реализуется за счет различных вариантов нагрева: газовый, электродуговой, плазменный или индукционный.

Модифицирование металла (НВ) осуществляется введением в металл проволоки с порошковым наполнителем-модификатором.

Особое внимание в практике непрерывной разливки стали уделяется дозированию металла из проковша. При истечении металла из проковша необходимо сформировать требуемый удельный расход стали (в соответствии со скоростью вытягивания заготовки), максимально компактную поверхность струи, а также её защиту от вторичного окисления. На практике повсеместно применяют схему дозирования типа «стопор»-«стакан-дозатор» (рисунок 23). При этом расход металла по ходу разливки регулируется положением головки стопора относительно стакана-дозатора. Управление стопора осуществляется с помощью специального механизма, работающего либо в ручном, либо в автоматическом режиме.



- 1 – коллектор шибера затвора стальковша; 2 – защитная труба; 3 – стопор;
 4 – футеровка проковша; 5 – стакан-дозатор; 6 – погружной стакан;
 7 – кристаллизатор; 8, 11 – подвод аргона; 9 – теплоизолирующая смесь;
 10 – шлакообразующая смесь

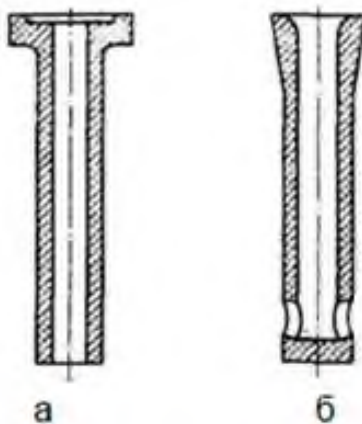
Рисунок 23 – Схема движения стали из сталеразливочного ковша в кристаллизатор

Для защиты металла от вторичного окисления и азотирования используют-

ся погружные стаканы и защитные трубы (из периклазо-графита или корундо-графита со вставками из цирконо-графита в зонах шлакового пояса). Погружные стаканы предназначены для защиты металла на участке промежуточный ковш – кристаллизатор. Для сортовых машин используются погружные стаканы с прямым выходом, а для слябовых – с выходами под разными углами. Защитные трубы используются для защиты металла от контакта с воздухом на участке «сталеразливочный ковш – промежуточный ковш».

Защитная труба устанавливается в процессе разливки стали между сталеразливочным и промежуточными ковшами и предназначена для защиты стали от вторичного окисления и азотирования на этом на участке движения. Для предотвращения подсоса воздуха встык между коллектором шибберного затвора стальковша и защитной трубой рекомендуется подача аргона через распределительное кольцо, расположенное над стыком.

Погружной стакан является важнейшим функциональным элементом, обеспечивающим подвод струи под уровень металла в кристаллизатор, способствуя рациональной организации движения потоков в жидкой ванне, а также защиту стали от вторичного окисления и азотирования на участке «промковш–кристаллизатор». На практике различают сквозные и глухонные погружные стаканы (рисунок 24), имеющие два боковых отверстия для слябовых МНЛЗ и четыре – для блюмовых.



а – сквозной погружной стакан;

б – глухонный погружной стакан (с двумя выходными отверстиями)

Рисунок 24 – Погружные стаканы

В начале освоения непрерывной разливки применяли стаканы из плавленого кварца, но впоследствии в результате расширения марочного состава сталей, разливаемых на МНЛЗ, условия службы огнеупоров усложнились, и преимущественное распространение получили глиноземо-графитовые и периклазо-графитовые погружные стаканы.

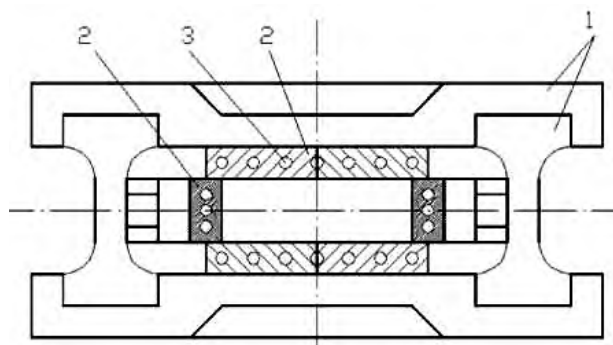
5.5 Кристаллизатор с механизмом качания

Кристаллизатор – сквозная водоохлаждаемая форма, в которой формируется корочка и профиль НЛЗ. Кристаллизатор должен обеспечить быстрое формирование достаточно толстой и прочной корки НЛЗ без дефектов. Для обеспечения интенсивного теплоотвода стенки кристаллизаторов делают водоохлаждаемыми, а внутреннюю их часть (рабочую), соприкасающуюся с жидким металлом, выполняют из высокотеплопроводной меди.

Внутренняя стенка кристаллизатора работает в тяжелых условиях (контакт с высокотемпературным расплавом, истирающее действие заготовки, воздействие ферростатического давления и т.д.). С целью повышения износостойкости и температуры разупрочнения (рекристаллизации) медь легируют хромом (до 1 %) или серебром (0,15-0,2 %). На рабочую поверхность наносят износостойкие покрытия на основе хрома, никеля, циркония и т.п. Охлаждение кристаллизатора производится химически очищенной водой. Во избежание выпадения в каналах нерастворимого осадка вода не должна нагреваться выше 40 °С, а чтобы обеспечить интенсивный теплоотвод, скорость потока воды должна быть равной 5-10 м/с. Расход воды составляет около 90 м³/ч на 1 м² рабочей площади кристаллизатора.

В продольном сечении в зависимости от формы технологической оси МНЛЗ кристаллизаторы могут быть прямолинейными или радиальными. Наиболее распространены кристаллизаторы с прямыми стенками, настроенными с конусностью от 0,5 до 1,5 % (на сторону).

По конструктивному исполнению выделяют кристаллизаторы трех типов: сборные, блочные и гильзовые. Для отливки слябовой заготовки наиболее широкое распространение получили сборные кристаллизаторы (рисунок 25). Рабочие стенки выполняют из толстых (50-70 мм) медных пластин (при малой толщине 10-20 мм происходит их коробление, приводящее к образованию продольных трещин в корке НЛЗ). Стойкость рабочих стенок кристаллизаторов без износостойких покрытий достигает 500 плавов, а с покрытиями – до 1200 большегрузных плавов.



1 – стальной каркас; 2 – рабочие стенки; 3 – каналы для охлаждающей воды

Рисунок 25 – Схема сборного кристаллизатора

Характерной особенностью сборного кристаллизатора является возможность изменения ширины (и толщины) отливаемой заготовки. Это достигается перемещением узких стен, вставленных между широкими, с помощью различных механических или электромеханических или электро-гидравлических приводов (рисунок 26). Изменение толщины заготовки обеспечивается заменой узких стенок.

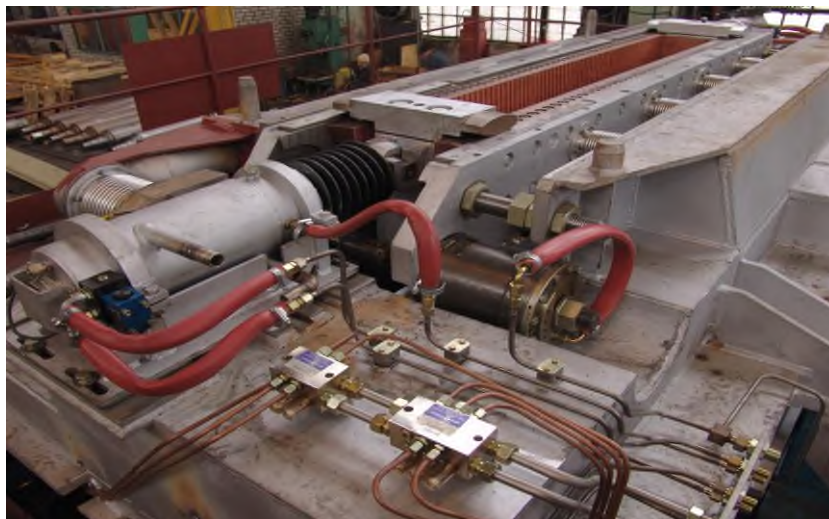


Рисунок 26 – Кристаллизатор слябовой МНЛЗ в сборе с гидравлическим приводом перемещения узких стенок

Блочные кристаллизаторы, используемые для отливки блюмов и сортовой заготовки, изготавливаются из сплошной медной заготовки, *гильзовые* (для отливки круглой НЛЗ) – из медных цельнотянутых труб. В отличие от сборных кристаллизаторов, блочные и гильзовые кристаллизаторы предназначены для отливки заготовки одного сечения. Их преимуществами являются более простая конструкция и надежность.

Качество НЛЗ в значительной степени определяется прочностью первичной корочки, формируемой в кристаллизаторе. При слабой корочке возможен её разрыв в результате трения о стенки кристаллизатора при вытягивании заготовки или выпучивание корочки в зоне вторичного охлаждения. Обычно её толщина на выходе из кристаллизатора составляет 15-45 мм, а требования к толщине (и прочности) повышаются с увеличением сечения НЛЗ. Увеличение толщины корочки может быть достигнуто уменьшением скорости вытягивания или увеличением высоты кристаллизатора. Однако в первом случае снижается производительность установки, а во втором увеличивается трение между заготовкой и стенками кристаллизатора. В зависимости от конструкции МНЛЗ длина кристаллизатора составляет 650-1100 мм, а требуемая толщина корочки достигается регулированием скорости вытягивания НЛЗ. Чтобы заготовка более длительное время контактировала со стенками кристаллизатора, прямолинейные рабочие стенки кристаллизатора устанавливаются с обратной конусностью,

либо выполняют рабочие стенки 3-х плоскостной или параболической формы, повторяющей динамику усадки НЛЗ.

Для уменьшения трения между заготовкой и стенками кристаллизатора между ними подается смазка

– при разливке открытой струей на стенки кристаллизатора подаются растительные (например, рапсовое) или синтетические масла, продукты сгорания которых (сажа), налипают на стенки кристаллизатора, выполняя роль смазки;

– при разливке через погружной стакан (метод разливки «под уровень» металла в кристаллизаторе) в кристаллизаторе подаются шлаковые смеси, которые кроме снижения трения, стабилизируют условия теплоотвода, поглощают неметаллические включения и предотвращают вторичное окисление металла.

Удельный расход рапсового масла для обеспечения смазки стенок кристаллизатора составляет 0,08-0,10 кг/т, а при дополнительной защите зеркала металла от окисления за счет продуктов сгорания масла может быть увеличен до 0,2-0,4 кг/т. Расход ШОС обычно находится в пределах 0,3-0,6 кг/т.

Опыт эксплуатации МНЛЗ показал, что в результате прилипания корочки НЛЗ к стенке кристаллизатора возможно зависание заготовки в кристаллизаторе. При этом образуются разрывы корочки, что не только ухудшает поверхность заготовки, но и может быть причиной аварии при разливке.

Чтобы предотвратить приваривание и разрывы корочки, облегчить попадание смазки между заготовкой и стенкой кристаллизатора, а главное, обеспечить сваривание (залечивание) разрывов корочки, кристаллизатору сообщается возвратно-поступательное движение с помощью механизма качания кристаллизатора.

Механизм качания кристаллизатора сообщает ему возвратно-поступательное движение с целью предотвращения прилипания и зависания корки НЛЗ на стенках кристаллизатора (за счет снижения коэффициента трения при увеличении скорости взаимного перемещения трущихся поверхностей), залечивания разрывов (за счет ускорения теплоотвода при увеличении активной контактной площади теплосъема) и затягивания смазки между кристаллизатором и НЛЗ.

По принципу работы механизмы качания бывают:

– электромеханическими (эксцентрикковые или рычажно-шарнирные механизмы), реализующими синусоидальный закон качания;

– электрогидравлическими (рессорные или гидравлические), обеспечивающими несинусоидальный режим качания.

Вплоть до последних 10-15 лет синусоидальный режим колебаний рассматривался как стандартный режим, применяющийся практически на всех МНЛЗ. Это объясняется тем, что его модель достаточно проста в реализации и

имеет преимущества в виде меньших моментов инерции и меньших рывков ускорения.

В последнее время основная доля новых и модернизированных МНЛЗ оснащается кристаллизаторами с гидроприводами, которые позволяют осуществлять несинусоидальный режим качаний (рисунок 27). Считается, что несинусоидальные режимы качания позволяют существенно повысить скорость разлива и улучшить качество поверхности заготовки.

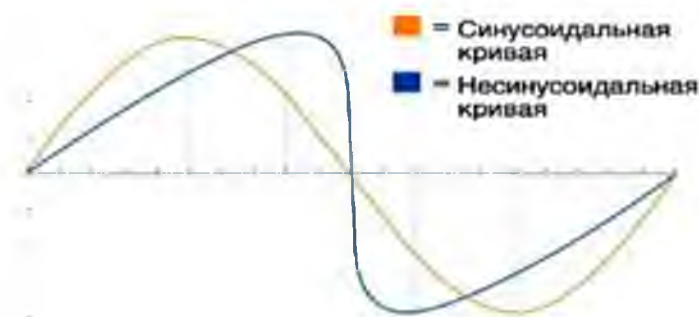


Рисунок 27 – Графики изменения скорости движения кристаллизатора для синусоидального и несинусоидального закона

Оптимальный режим качания кристаллизатора реализуется в следующей последовательности: вниз он опускается с некоторым опережением (это обеспечивает заваривание надрывов корочки), а вверх – с максимальной скоростью (для снижения трения и растягивающих усилий на корочку), реализуемой механизмом качания. Амплитуда качания современных механизмов изменяется в пределах от 1 до 5 мм, частота – от 100 до 600 циклов в минуту (до 10 Гц). Развитие конструкций механизмов качания идет в направлении повышения частоты при снижении амплитуды, что позволяет минимизировать механические нагрузки на корочку и уменьшить величину (глубину) «следов от качания кристаллизатора» на поверхности НЛЗ – поперечные углубления в виде канавок на поверхности заготовки (рисунок 28). Нормальным положением следов качания считается их параллельное расположение друг относительно друга с одинаковым расстоянием между следами.



Рисунок 28 – Характер расположения следов качания на поверхности заготовки

Важным параметром оптимизации закона качания кристаллизатора и параметров качания является глубина проникновения следов качания, которая может колебаться от нескольких десятых долей миллиметра до 1,5-2,0 мм и более.

5.6 Зона вторичного охлаждения МНЛЗ

Основной технологической функцией зоны вторичного охлаждения (ЗВО) является создание оптимальных условий для полного затвердевания отливаемой НЛЗ, обеспечивающих требуемое качество заготовки. Протяженность ЗВО проектируется под длину жидкой лунки в НЛЗ (в зависимости от толщины и скорости вытягивания) и составляет 15-40 м. На всем этом участке одновременно с затвердеванием металла происходит воздействие на него многочисленных силовых факторов, приводящих к различным напряжениям в затвердевшей части заготовки.

Причинами напряжений в НЛЗ являются:

- термическое напряжения, зависящие от условий охлаждения;
- фазовые, определяемые особенностями затвердевания стали разного состава;
- растягивающие напряжения, определяемые сопротивлением от вытягивания НЛЗ;
- напряжения, возникающие под действием ферростатического давления жидкого расплава, которые вызывают выпучивание корки НЛЗ;
- механические, определяемые формой технологической оси.

Большое влияние величину нагрузок, которые испытывает заготовка в ЗВО, оказывает форма технологической оси, в соответствии с которой НЛЗ подвергается воздействию различного рода усилий при её разгибании или правке. В результате формирования НЛЗ в ЗВО всегда происходит в условиях одновременных, но различных по интенсивности воздействий, определяющих в целом напряженно-деформированное состояние литой заготовки и, как следствие, ее качество. В связи с этим конструкция ЗВО должна отвечать следующим требованиям:

- 1) обеспечивать заданную траекторию движения НЛЗ и поддержку НЛЗ, исключаящую выпучивание (раздутие) корочки (реализуется поддерживающими роликами);
- 2) обеспечивать оптимальный теплоотвод и его регулирование в зависимости от скорости вытягивания и сортамента отливаемой стали (реализуется системой форсуночного охлаждения);
- 3) сохранять прочностные характеристики поддерживающих устройств в условиях высоких температур и нагрузок в процессе длительной эксплуатации машины (реализуется в результате охлаждения роликов, подбора смазки подшипников и др.);
- 4) обеспечивать быструю замену узлов ЗВО при аварийных ситуациях, а также минимальные потери времени на переналадку, связанную с изменением сечения отливаемой заготовки (реализуется путем объединения роликов и фор-

сунок в секции ЗВО по 2-10 пар роликов в каждой).

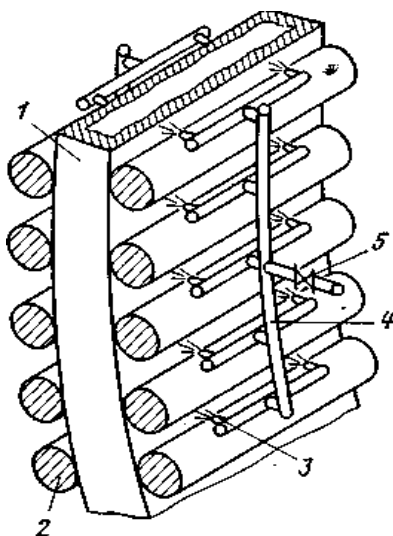
5) длина зоны вторичного охлаждения должна обеспечивать полное затвердевание НЛЗ при максимальной скорости вытягивания, то есть превышать протяженность лунки жидкого металла.

Для удовлетворения вышеуказанным требованиям конструкция ЗВО состоит из форсуночной системы охлаждения и роликовой системы поддержки НЛЗ.

Система роликовой поддержки заготовки в ЗВО (рисунок 29).

Опорные ролики направляют движение заготовки и предотвращают деформацию (выпучивание) граней НЛЗ под действием ферростатического давления. Непосредственно под кристаллизатором, где оболочка заготовки имеет небольшую толщину и прочность, ее деформация может приводить к прорывам металла, а в нижних зонах вторичного охлаждения – к образованию трещин и ликвационных полосок вблизи фронта затвердевания.

В машинах для отливки НЛЗ квадратного или близкого к квадрату прямоугольного сечения (бюмовая и сортовая заготовка) опорные ролики расположены со всех четырех сторон заготовки; при отливке слябовых НЛЗ – вдоль двух широких граней заготовки; при отливке круглой заготовки необходимы только направляющие ролики (поддерживающие не требуются). У узких торцевых граней при отливке слябовой заготовки ролики имеются лишь вблизи кристаллизатора. Для удобства замены при ремонтах группы соседних пар роликов объединены в отдельные секции, где в общем каркасе смонтировано от 2 до 10 пар роликов. Ролики, расположенные вблизи кристаллизатора обычно являются неприводными, на участке с постоянным радиусом кривизны лишь некоторые ролики соединены с приводом, а на участке разгибания и выпрямления все или почти все ролики приводные.



1 - заготовка; 2 - опорный ролик; 3 - форсунка;
4 - трубчатый коллектор; 5 - задвижка

Рисунок 29 – Секция вторичного охлаждения криволинейной МНЛЗ

Диаметр роликов может составлять 120-600 мм (в зависимости расположения в ЗВО). Меньшие диаметры роликов используются в верхних зонах ЗВО, где требуется в максимальной степени поддерживать корочку НЛЗ. По мере увеличения толщины затвердевающей корки жесткость НЛЗ возрастает, диаметр роликов (и расстояние между ними) по мере отдаления от кристаллизатора увеличивается. Так, при отливке НЛЗ толщиной до 300 мм диаметр роликов от 150-200 мм у кристаллизатора возрастает до 480-600 мм на горизонтальном участке, на котором заготовка разгибается.

В процессе движения заготовки по ЗВО происходит изменение (уменьшение) ее геометрических размеров вследствие усадки стали. Поэтому положение роликов в ЗВО обязательно учитывает конусность непрерывнолитой заготовки и к ней привязывается положение каждого ролика. На практике точность положения роликов вдоль технологической оси колеблется в пределах от 0,05 до 0,1 мм. В процессе эксплуатации МНЛЗ положение опорных роликов контролируется и корректируется.

На участке распрямления, кроме выполнения функции поддержания заготовки и ее вытягивания, на ролики добавляется функция правки заготовки. Обычно разгиб заготовки осуществляется в нескольких точках (например, 2-3 точки для сортовых МНЛЗ, 5-8 и более точек для слябовых МНЛЗ), что предотвращает появление поперечных трещин.

В настоящее время на современных слябовых и блюмовых МНЛЗ с целью подавления осевой пористости и ликвации широко используется метод «мягкого» обжата. Этот метод предполагает обжатие заготовки в жидко-твердом состоянии. При этом фронты кристаллизации противоположных граней сближаются и выдавливают жидкую фазу в образовавшиеся в процессе кристаллизации усадочные полости, а также вверх заготовки. Как правило, величина обжата, составляет несколько миллиметров по каждой стороне и выбирается из соображений обеспечения качества внутренних заготовки.


Система охлаждения заготовки в ЗВО. Режим охлаждения заготовки в ЗВО должен обеспечить минимальную продолжительность полного затвердевания НЛЗ и отсутствие поверхностных и внутренних дефектов. Для этого режим охлаждения заготовки в ЗВО должен обеспечивать:

- монотонное снижение температуры поверхности заготовки до полного затвердевания;
- равномерное распределение температуры по поверхности НЛЗ в поперечном сечении;
- недопущение снижения температуры поверхности НЛЗ ниже температур потери пластичности;
- возможность регулирования интенсивности охлаждения в зависимости от марки разливаемой стали, скорости разливки и температуры перегрева;

– надежность работы системы в течение длительного времени.

Снижение температуры заготовки в ЗВО достигается путем опрыскивания заготовки водой или водовоздушной смесью, отвода тепла к поддерживающим роликам, а также вследствие конвекции и лучеиспускания в окружающую среду. В системах вторичного охлаждения современных МНЛЗ применяются форсунки с различной конфигурацией поля орошения (таблица 4).

Таблица 4 – Основные типы форсунок, применяемых для охлаждения заготовок, и характер образуемого ими факела

Тип и внешний вид форсунок			
Плоскоструйная (плоскофакельная)	Круглофакельная	Круглофакельная	Полноконусная с квадратным факелом
			
Характер поля орошения и внешний вид факела			
прямоугольник	овал	круг	квадрат
			

Кроме различий в характеристиках распыла, форсунки подразделяются по способу подачи охлаждающего вещества: охлаждение струями воды (струйное охлаждение) или водовоздушной смесью (водовоздушное охлаждение).

В струйных форсунках распыление воды осуществляется посредством ее дробления на капли при прохождении через сопло определенной конфигурации. В результате, вода, подаваемая под давлением 0,25-0,35 МПа, самостоятельно дробится (за счет перепада давлений) на капли размером 0,2-1,0 мм и в виде факела плоской, овальной или округлой формы попадает на охлаждаемую поверхность. Струйное (водяное) охлаждение имеет ряд существенных технологических недостатков: величина теплоотдачи не всегда увеличивается пропорционально увеличению расхода воды; капли из водяной форсунки обычно

достаточно крупные, что не способствует увеличению скорости парообразования и ограничивает эффективность охлаждения; в месте воздействия водяной струи с заготовкой происходит термический удар, который может привести к зональной ликвации или образованию трещин и т.д. Между тем, система струйного охлаждения является достаточно простой в конструкционном плане.

Водовоздушное охлаждение осуществляется частицами воды, которые распыляются воздухом. Распыление воды происходит в результате соударения двух потоков (водяного и воздушного) внутри смесителя форсунки. Воздух при этом способе охлаждения играет двоякую роль: он обеспечивает распыление воды и сообщает каплям необходимую высокую кинетическую энергию.

Основные технологические преимущества системы водовоздушного охлаждения заключаются в следующем:

- высокие скорости движения потоков непосредственно в отверстиях форсунки, что существенно уменьшает вероятность её зарастания;

- высокая эффективность охлаждения, связанная с увеличенной площадью теплообмена между охладителем и заготовкой вследствие образования мелкодисперсных капель воды (размер капель 20-150 мкм) и их высокой кинетической энергией;

- более равномерное распределение охладителя по полю орошения (способствует устранению местного переохлаждения и повторного нагрева металла) и большая устойчивость геометрических размеров факела к изменению параметров охладителя;

- широкий диапазон изменения параметров подачи охлаждающей жидкости и воздуха без изменения параметров распыления, что дает возможность изменять скорость разлива в широких пределах без потери качества заготовки;

Таким образом, система водовоздушного охлаждения обеспечивает распыление воды до более мелких капель, что повышает равномерность охлаждения («мягкое» охлаждение), и позволяет регулировать расход воды без потери качества распыления. Однако, несмотря на существенные преимущества водовоздушного охлаждения, струйная подача охладителя используется под кристаллизатором, обеспечивая наряду с интенсивным охлаждением заготовки, теплоотвод от роликов поддерживающей системы (обеспечивая их надежную работу).

Форсунки располагают между опорными роликами в один, два или три ряда вдоль направления движения заготовки в зависимости от её ширины. При отливке слябовых заготовок охлаждают широкие грани; у узких граней форсунки устанавливают лишь под кристаллизатором.

Интенсивность охлаждения должна уменьшаться по мере удаления НЛЗ от кристаллизатора. С тем, чтобы обеспечить постепенное снижение расхода воды, зону вторичного охлаждения делят по длине на секции, объединяющие группу форсунок и имеющих самостоятельный подвод воды.

Общий вид роликовой секции с опорными роликами и системой форсуночного орошения представлен на рисунке 30.

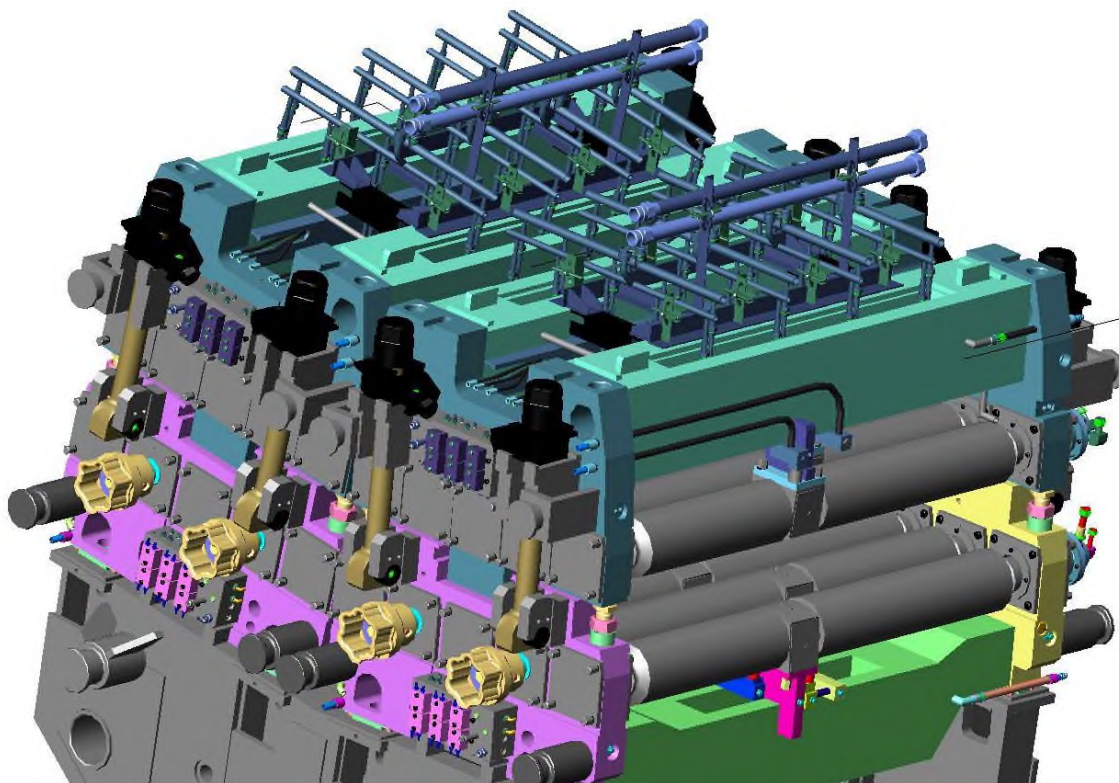


Рисунок 30 – Роликовая секция ЗВО

Интенсивность вторичного охлаждения зависит от свойств разливаемой стали (склонности к образованию трещин) и от скорости разливки, при росте которой интенсивность подачи воды увеличивают. При чрезмерной интенсивности вторичного охлаждения из-за переохлаждения поверхности заготовки и возникающих при этом термических напряжений, на поверхности и по глубине НЛЗ возникают трещины (внутренние и сетчатые поверхностные трещины). При слишком малой интенсивности охлаждения недостаточно прочная горячая корка заготовки может деформироваться («раздутие» НЛЗ). Общий расход воды на вторичное охлаждение при разливке спокойной стали составляет 0,4-1,0 м³/т при скорости вытягивания крупных НЛЗ 1,0-1,4 м/мин.

5.7 Тянуще-правильная клеть и порезка заготовки. Затравка

Участок тянуще-правильной клетки.

Равномерность вытягивания непрерывнолитой заготовки является необходимым условием стабильности технологического процесса разливки. Скорость вытягивания заготовки регулируется специальным устройством – тянущей клетью, которая располагается в той зоне, где заготовка уже практически полностью затвердела. Тянущая клеть выполняется в виде отдельной секции, состоящей из нескольких приводных верхних и нижних роликов. В радиальных и

криволинейных МНЛЗ тянущая клеть выполняет также функция правки, поэтому называется тянуще-правильной. Конструктивно тянуще-правильная клеть состоит из одной-двух секций приводных роликов.

Распрямление заготовки представляет собой процесс деформации при котором верхние слои заготовки (по малому радиусу) испытывают растягивающие напряжения, а по большому радиусу – напряжения сжатия. Для снижения вероятности образования поперечных трещин при разгибании заготовки эту процедуру проводят в несколько стадий: в 2-3 точках для сортовых МНЛЗ и в 5-12 точках для слябовых и блюмовых МНЛЗ. На выходе из МНЛЗ (после тянуще-правильной клетки) заготовка разделяется на мерные длины.

Устройство порезки заготовки на мерные длины устанавливаются в конце технологической линии МНЛЗ на ее горизонтальном (либо вертикальном) участке. Для резки НЛЗ применяются газокислородные резаки (газовая резка) или механические (гидравлические) ножницы (гильотинная резка). Вне зависимости от способа резания, устройство снабжено механизмом передвижения, позволяющим осуществлять порезку в процессе движения заготовки, то есть без остановки её движения. Наибольшее распространение получила газовая резка, отличающаяся сравнительной простотой и надежностью. Газорезка – это подвижная тележка, снабженная газокислородными резаками, которые при резке перемещаются поперек слитка, а сама газорезка при этом движется со скоростью НЛЗ. После окончания резки газорезка возвращается в исходное положение, после чего цикл повторяется. Современный резак для слябовой заготовки, например, обеспечивает скорость резания 250-500 мм/мин в зависимости от марки стали и толщины заготовки со средней шириной реза 8-10 мм. Для широких слябов предусматриваются два резака,двигающиеся на встречу друг другу.

Основными преимуществами газовой резки являются сравнительная компактность машин газовой резки, низкая стоимость оборудования, а также сохранение требуемой геометрической формы торцов заготовки после порезки (нет смятия).

Недостатки газовой резки:

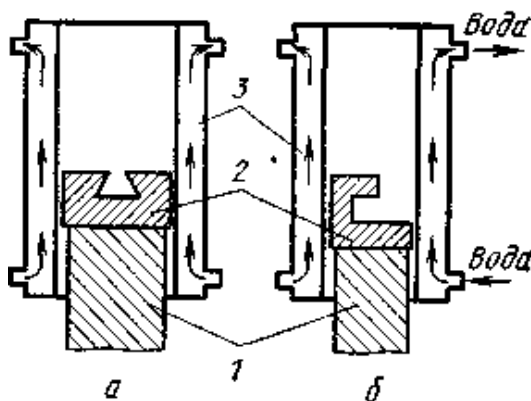
- потери (до 0,2%) металла в процессе резки и необходимость уборки продуктов порезки – окалина;
- наличие на кромке реза окисдно-металлических наплывов («грат»), которые необходимо убирать до начала прокатки;
- работа газорезки сопровождается шумом и выделением большого количества газов.

Другим методом разделения непрерывнолитой заготовки на мерные длины является порезка с помощью *механических гидравлических ножниц*. Они не издают дополнительного шума, обеспечивают высокую скорость порезки, не тре-

буют специальных устройств для уборки окалины. Однако использование этого метода ограничивается большой массой, высокой стоимостью оборудования и эксплуатационных расходов (применение оправдано при толщине НЛЗ до 100 мм). Кроме того, порезка с помощью гидравлических ножниц приводит к деформированию профиля заготовки в месте реза (смятие).

Затравка (с механизмом уборки и хранения) предназначена для вытягивания первых метров отливаемой НЛЗ. По сути это устройство для образования временного дна в кристаллизаторе при заполнении его жидким металлом и последующего вытягивания формирующейся непрерывнолитой заготовки.

На вертикальных и горизонтальных МНЛЗ затравка представляет собой металлическую штангу, а на машинах с криволинейной осью она выполнена из шарнирно соединенных звеньев. Затравка снабжена головкой, в которой имеется углубление в виде «ласточкин хвоста» или Г-образной формы (рисунок 31). С сечение головки затравки соответствует сечению отливаемой НЛЗ. Перед началом разливки затравку вводят в кристаллизатор, и ее головка образует временное дно, а низ затравки находится в тянущих роликах. Заливаемый в кристаллизатор металл застывает в углублении головки, обеспечивая сцепление затравки с заготовкой. При включении тянущих валков затравка начинает двигаться вниз и тянет за собой заготовку. После выхода затравки из тянущих роликов её отделяют от НЛЗ.



1 – затравка; 2 – головка затравки; 3 – кристаллизатор

Рисунок 31 – Затравка в кристаллизаторе перед началом разливки с головкой типа «ласточкин хвост» (а) и с Г-образной головкой (б)

5.8 Контрольные вопросы для самопроверки

1. Укажите отличительные особенности слябовой, блюмовой и сортовой заготовки.
2. Какое оборудование в конструкции машины полунепрерывного литья отсутствует в сравнении с машинами непрерывной разливки?
3. Может ли МНЛЗ работать в режиме машины полунепрерывного литья?

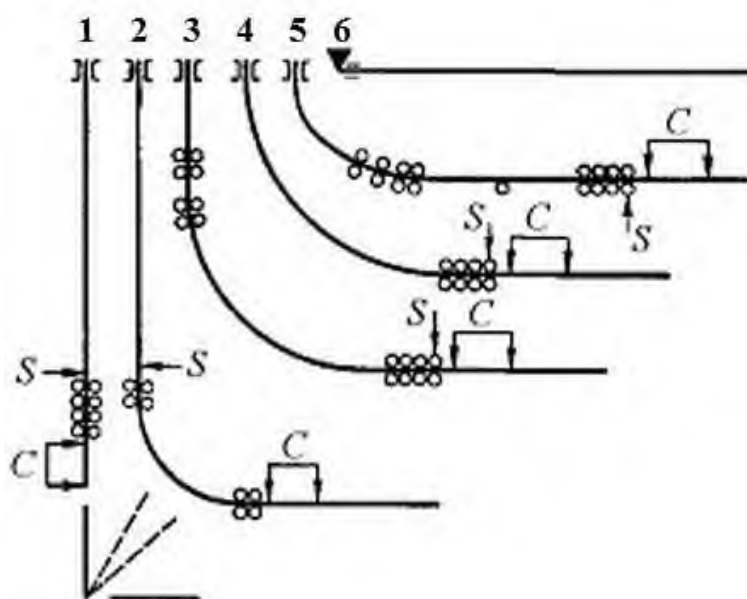
4. Что такое ручей МНЛЗ?
5. За счет чего в первую очередь следует обеспечивать достижение заданной производительности разливочного отделения при непрерывной разливке стали известного сечения?
6. Как классифицируются МНЛЗ по расположению основной технологической оси и виду отливаемой заготовки?
7. Как классифицируются МНЛЗ по количеству одновременно отливаемых заготовок и варианту движения кристаллизатора?
8. Перечислите основные узлы МНЛЗ.
9. Укажите разновидности и функции установок для быстрой замены сталеразливочных ковшей.
10. Какие функции выполняет промежуточный ковш МНЛЗ?
11. За счет чего обеспечивается постоянный и небольшой напор струи металла, подаваемого из промковша в кристаллизатор?
12. Что в конструкции промежуточного коша служит для регулирования скорости подачи металла в кристаллизатор?
13. Из каких соображений выбирается вместимость промежуточного ковша?
14. В чем опасность снижения уровня металла в промежуточном ковше до 400 мм и менее?
15. Какие функции выполняют теплоизоляционный, арматурный и рабочий слои футеровки промежуточного коша?
16. Для чего служит металлоприемник в конструкции промковша?
17. Что в конструкции промежуточного ковша связано с процессом рафинирования металла от неметаллических включений?
18. С какой целью при непрерывной разливке стали используют погружные стаканы и защитные трубы?
19. Погружные стаканы каких видов применяют при непрерывной разливке?
20. Что в конструкции МНЛЗ обусловлено естественной усадкой стали?
21. Укажите основную функцию кристаллизатора.
22. Укажите величину конусности рабочих стенок кристаллизатора.
23. Какое преимущество характерно для сборных кристаллизаторов?
24. Как изменяются требования к толщине корочки НЛЗ на выходе из кристаллизатора при увеличении толщины отливаемой заготовки?
25. Каким путем обеспечивается увеличение толщины затвердевшей корочки на выходе из кристаллизатора?
26. Зачем прямолинейные рабочие стенки кристаллизатора устанавливаются с обратной конусностью?
27. Что влияет на усилие вытягивания заготовки из кристаллизатора?
28. Что относится к функциям механизма качания кристаллизатора?
29. Укажите параметры качания кристаллизатора.

30. К какому негативному последствию приводит качание кристаллизатора?
31. Укажите основную функцию зоны вторичного охлаждения.
32. Чем при проектировании МНЛЗ руководствуются при определении расстояния между рядами роликов в зоне вторичного охлаждения?
33. Какие функции выполняют опорные ролики, входящие в состав ЗВО?
34. Каким образом обеспечивается снижение капитальных затрат, трудоемкости операций по ремонту элементов зоны вторичного охлаждения и перенастройке МНЛЗ?
35. Как следует изменять расстояние между опорными роликами и их диаметр по мере удаления от кристаллизатора и почему?
36. Какие требования относятся к системе охлаждения заготовки в ЗВО?
37. В чём основные преимущества водо-воздушной системы вторичного охлаждения перед струйной?
38. Укажите основное назначение затравки в технологии непрерывной разливки стали.
39. Укажите достоинства и недостатки устройства газовой порезки НЛЗ.
40. Укажите достоинства и недостатки устройства гильотинной порезки НЛЗ.
41. Зачем распрямление непрерывнолитой заготовки проводят в несколько стадий?

Тема 6 Сравнительная характеристика МНЛЗ и технология непрерывной разливки

6.1 Сравнительная характеристика МНЛЗ с различным расположением технологической оси

По расположению основной технологической оси МНЛЗ (направления движения отливаемой заготовки) различают (рисунок 32) машины вертикального типа (1), вертикальные с изгибом затвердевшей заготовки (2) вертикально-радиальные и вертикально-криволинейные (3), радиальные (4), криволинейные (5) и горизонтальные (6).



C – зона порезки заготовки; S - конец затвердевания

Рисунок 32 – Виды МНЛЗ по расположению технологической оси

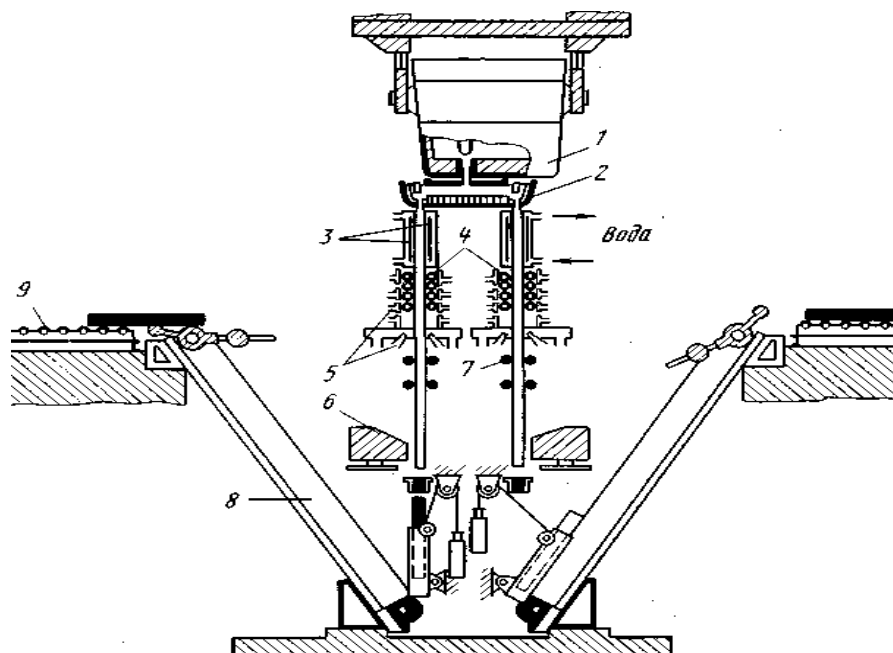
Вертикальные МНЛЗ.

Первоначально (50-е и 60-е годы XX века) МНЛЗ имели вертикальную компоновку, включая участок порезки заготовки на мерные длины. Преимущества таких МНЛЗ заключаются в возможности отливки заготовки сложного профиля (рельс, двутавр) и улучшении условий формирования заготовки (минимальные механические воздействия и улучшение условий всплывания неметаллических включений), что повышает качество внутренней структуры заготовки.

Технологическая ось вертикальной МНЛЗ расположена вертикально. Пример вертикальной МНЛЗ, располагаемой частично в колодце и частично в надземном сооружении, приведен на рисунке 33.

Разливка, кристаллизация и охлаждение НЛЗ проводится по стандартной технологии. Заготовки, после газорезки б поступают в корзины кантователя и под действием собственного веса опрокидываются на рольганг, который выво-

дит заготовку из корзины и подает ее на подъемник 8. Заготовка по рольгангу 9 выходит из машины и направляется в прокатные цехи или на склад для удаления дефектов.



- 1 – сталеразливочный ковш; 2 – промежуточный ковш; 3 – кристаллизатор;
 4 – опорные ролики; 5 – форсунки ЗВО; 6 – устройство газокислородной резки;
 7 – тянущая клетка; 8 – подъемник; 9 – рольганг

Рисунок 33 – Схема вертикальной двухручьевой МНЛЗ

Основной недостаток вертикальных МНЛЗ – ограничение скорости разливки или сечения НЛЗ, а значит, и производительности установки. Поскольку затверждение должно закончиться до входа заготовки в тянущую клетку и зону резки, то увеличение глубины лунки жидкого металла при повышении скорости (или сечения заготовки) ведет к необходимости повышать металлургическую длину МНЛЗ, то есть высоту установки. Современные машины вертикального типа достигают высоты 40-43 м. Их сооружение требует или большого заглубления – до 25-27 м ниже уровня пола цеха, или строительства высоких зданий. И в том и в другом случае с увеличением высоты установки резко возрастают капитальные затраты, усложняются их эксплуатация и технологический процесс разливки.

Опыт эксплуатации вертикальных МНЛЗ показывает, что их целесообразно применять при металлургической длине установки, не превышающей 12-14 м.

Вертикальные МНЛЗ с изгибом заготовки.

Машины этого типа имеют вертикальный кристаллизатор и систему вторичного охлаждения с расположенной за ней тянущей клеткой, которые не отличаются от аналогичных устройств машин вертикального типа. Далее движу-

щуюся заготовку изгибают, переводя в горизонтальное положение. Затем НЛЗ поступает в выпрямляющие ролики, за которыми располагают газорезку. Подобные машины применяют при отливке заготовок небольшой толщины (<150 мм), поскольку при большей толщине из-за необходимости иметь большой радиус изгиба не достигается заметного снижения высоты по сравнению с вертикальной МНЛЗ.

Радиальные и криволинейные МНЛЗ

Стремление уменьшить высоту МНЛЗ привело к созданию (в 70-х годах XX века) радиальных установок (рисунок 34).

Конструктивной особенностью таких машин является наличие кристаллизатора определенного радиуса (соответствует базовому радиусу МНЛЗ R_0), что обеспечивает получение радиальной технологической линии. После затвердевания заготовки осуществляется ее разгиб в горизонтальной плоскости.

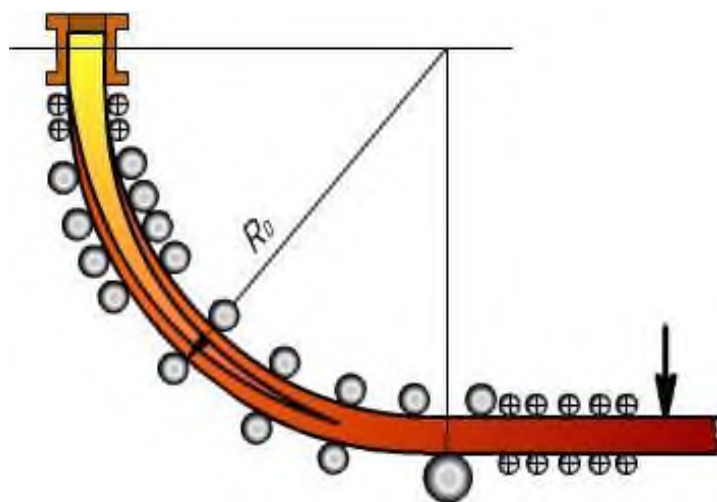


Рисунок 34 – Схема МНЛЗ радиального типа (R_0 – базовый радиус МНЛЗ)

Таким образом, в радиальных МНЛЗ на выходе из кристаллизатора заготовка движется по дуге с постоянным радиусом. После прохождения нижней точки дуги полностью затвердевшую заготовку разгибают, переводя её в горизонтальное положение. Максимальный радиус существующих МНЛЗ этого типа при отливке заготовок толщиной до 350 мм составляет 14 м.

Важнейшим конструктивным параметром радиальной установки является **радиус технологической оси**. Его величина определяется так, чтобы обеспечить длину пути, достаточную для полного затвердевания заготовки к моменту разгибания при заданной линейной скорости вытягивания, и не превысить допустимую степень деформации при разгибании, что могло бы привести к образованию трещин и разрывов в НЛЗ. Чтобы при последующем разгибании в заготовке не образовывались трещины, радиус изгиба должен быть более чем в 25-раз больше толщины НЛЗ. Обычно радиус изгиба выбирают в соответствии с соотношением $R = (30-40)a$, где a – толщина НЛЗ, м.

В криволинейных машинах НЛЗ вначале движется по дуге, определяемой радиусом кривизны кристаллизатора, а затем еще в зоне вторичного охлаждения радиус кривизны дуги увеличивается, то есть происходит постепенное разгибание заготовки с жидкой сердцевиной с последующим переводом в горизонтальное положение. Рассредоточение деформации имеет целью снизить возникающие при этом в корке заготовки напряжения и вероятность возникновения трещин.

Машины конструируют так, что горизонтальное движение заготовки осуществляется на уровне пола цеха. На этом же участке производят резку НЛЗ на мерные длины.

Основные преимущества машин радиальной и криволинейной компоновки по сравнению с вертикальными:

- меньшая высота, что снижает стоимость сооружения МНЛЗ и здания цеха;
- возможность повышения скорости разливки без значительного увеличения капитальных затрат, связанных с увеличением высоты цеха;
- возможность изменения мерной длины заготовки в широком диапазоне.

По этим причинам в последние годы почти отказались от сооружения вертикальных МНЛЗ и строят преимущественно криволинейные и радиальные.

Недостатки: усложняется конструкция и обслуживание кристаллизатора и ЗВО, а также системы качания, создаются нестационарные условия кристаллизации по сечению НЛЗ, ухудшаются условия всплывания неметаллических включений, формируется несимметричная структура заготовки, усложняется регулирование интенсивности охлаждения в ЗВО, необходима тянущеправильная клеть.

Наглядная иллюстрация ухудшения условий всплывания неметаллических включений и качества НЛЗ в радиальных и криволинейных машинах в сравнении с вертикальными показана на рисунке 35.

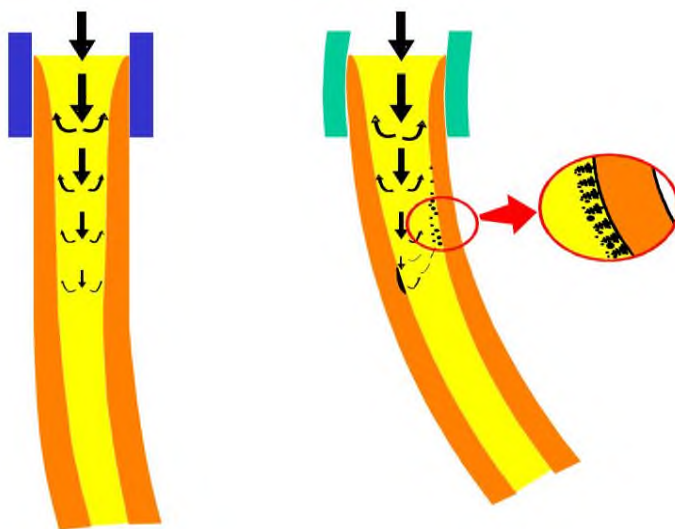
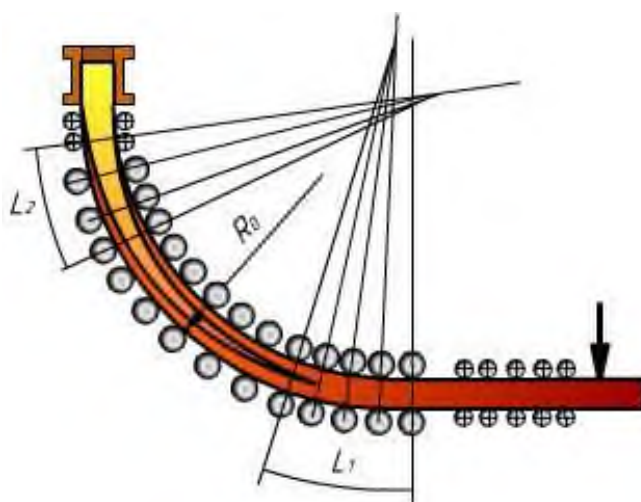


Рисунок 35 – Сравнение условий формирования заготовки в вертикальном (слева) и радиальном (справа) кристаллизаторе

Вертикально-радиальные/криволинейные МНЛЗ.

Машины этой разновидности имеют вертикально расположенный кристаллизатор и небольшой по высоте (3-4 м) вертикальный участок с опорными роликами, за которыми расположена секция изгибающих роликов, изгибающих полужатвердевшую заготовку, и далее радиальная роликовая проводка. После прохождения нижней точки дуги НЛЗ попадает в тянуще-правильную клеть и переводится в горизонтальное положение с последующей порезкой на мерные длины.

Такая компоновка обеспечивает благоприятные условия для формирования заготовки в начальный период затвердевания, в том числе для всплытия неметаллических включений. Кроме того, преимуществом вертикально-радиальных (вертикально-криволинейных) машин заключается в более простом в изготовлении и обслуживании прямолинейном кристаллизаторе и верхней части зоны вторичного охлаждения. Однако высота подобных установок превышает габариты радиальных МНЛЗ. Снижение высоты МНЛЗ обеспечивается при использовании вертикально-криволинейной компоновки (рисунок 36). В этом случае загиб затвердевающей заготовки осуществляется в 5-8 и более точках, что предотвращает возможность образования трещин и прорывов металла в твердой корочке.



L_1 – участок разгиба заготовки; L_2 – участок загиба заготовки;

R_0 – базовый радиус МНЛЗ

Рисунок 36 – Схема вертикально-криволинейной МНЛЗ

В целом МНЛЗ с искривленной технологической осью обладают рядом существенных **преимуществ по сравнению с вертикальными**:

- большая скорость разливки и возможность принимать большегрузные плавки при меньшем количестве ручьев;
- меньшая в 3-4 раза высота установки;
- капитальные затраты на 30-50 % ниже при равной производительности;

- возможность получения неограниченной по длине заготовки;
- облегчается обслуживание МНЛЗ, так как основное технологическое оборудование располагается над уровнем пола цеха;
- при горизонтальной выдаче заготовок возможно осуществление прокатки непосредственно после отливки заготовок.

Недостатки: более сложная конструкция; повышение требований к точности настройки роликов ЗВО; трудности в обеспечении равномерного охлаждения заготовки по грани большого и малого радиусов в зоне вторичного охлаждения; несимметричное строение НЛЗ.

Поэтому при выборе типа машины в условиях высокопроизводительных цехов предпочтение следует отдать радиальным и криволинейным МНЛЗ, а при отливке качественной стали, особенно сложного профиля, приоритет за вертикальными МНЛЗ.

Горизонтальная МНЛЗ.

Установки рассмотренных выше типов трудно, а часто и невозможно разместить в существующих зданиях сталеплавильных цехов. Для отливки непрерывных сортовых заготовок малого сечения и широкого сортамента в цехах с агрегатами малой и средней емкости разработаны горизонтальные МНЛЗ.

Технологическая ось горизонтальных МНЛЗ расположена горизонтально или наклонена на угол до $15-20^\circ$ к горизонтали. Схема горизонтальной МНЛЗ приведена на рисунке 37.

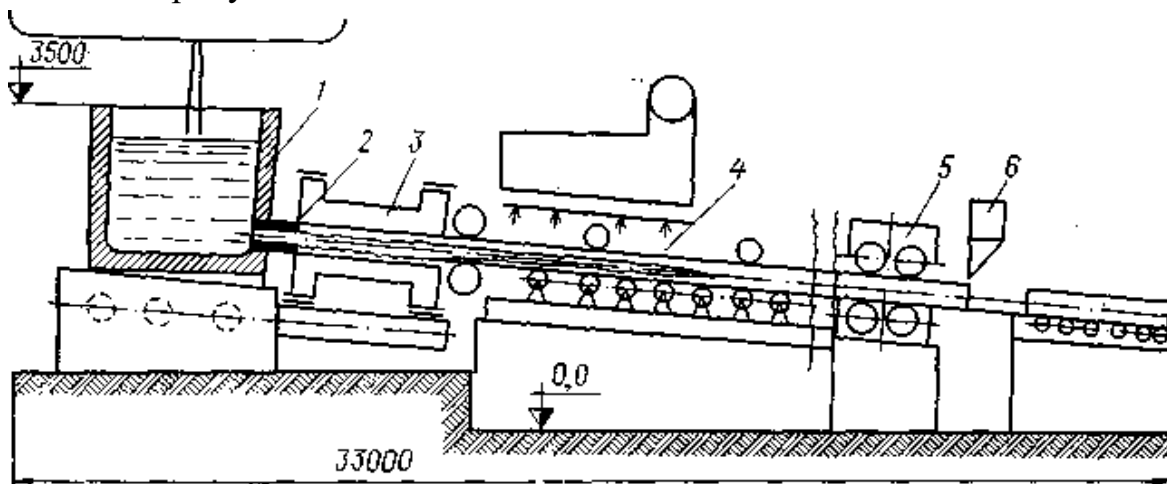


Рисунок 37 – Схема горизонтальной МНЛЗ (обозначения в тексте)

Машина имеет следующие основные технологические узлы:

1. металлоприемник – емкость, футерованную огнеупорным кирпичом;
2. металлопровод – узел, подающий металл в кристаллизатор, состоящий из металлического корпуса и огнеупорного стакана из нитрида бора, карбида кремния или периклазографита;
3. кристаллизатор – медный или комбинированный (медь-графит) холодильник, охлаждаемый водой;

4. зону вторичного охлаждения в виде рольганга и системы форсуночного охлаждения;
5. тянущее устройство, обеспечивающее периодическое вытягивание заготовки;
6. устройство для резки заготовки.

Сталь из разливочного ковша поступает в футерованный металлоприемник, жестко соединенный с кристаллизатором посредством огнеупорного стакана.

Зона вторичного охлаждения представляет собой рольганг с системой водяных форсунок. Далее расположен механизм периодического вытягивания НЛЗ. Механизм перемещает заготовку вперед на 20-50 мм, затем возвращается назад, после чего цикл повторяется; во время обратного движения механизма заготовка остается неподвижной, либо несколько осаживается назад. Число циклов изменяется от 20 до 100 в минуту.

Периодическое вытягивание НЛЗ заменяет качание кристаллизатора, используемое на вертикальных и криволинейных машинах для предотвращения зависания и разрывов корки НЛЗ в кристаллизаторе. За механизмом вытягивания расположена газорезка и рольганг с приводными роликами.

Основные преимущества горизонтальных машин – малая высота, меньшее количество и масса оборудования и, следовательно, меньшая стоимость их строительства.

Недостатки – неоднородная структура (неметаллические включения и усадочные дефекты в верхней части НЛЗ), низкая стойкость стакана и кристаллизатора. Поэтому горизонтальные МНЛЗ применяют для отливки сортовых заготовок толщиной менее 150-200 мм.

6.2 Технология и показатели непрерывной разливки стали

Требования к разливаемой стали

Температурные условия:

- температура металла в промежуточном ковше на 10-20 °С выше температуры ликвидуса;
- перепад температур металла в промежуточном ковше в пределах +/- 3-5°С;
- перегрев в сталеразливочном ковше на 45-55 °С выше температуры ликвидуса.

С целью снижения пораженности НЛЗ трещинами сталь должна содержать менее 0,015 % серы при величине отношения Mn/S выше 25, менее 0,015 % фосфора и до 8 ppm водорода, а также иметь однородный химический состав.

После окончания разливки предыдущей плавки (или серии плавков при разливке методом «плавка на плавку») МНЛЗ готовят к следующей разливке. В эту

подготовку входят следующие операции:

- проверка стенок кристаллизатора и его положения относительно оси МНЛЗ;
- проверка форсунок вторичного охлаждения и расстояния между роликами зоны вторичного охлаждения и тянущих устройств, осмотр прочего оборудования;
- введение затравки в кристаллизатор и заделка зазора между головкой затравки и кристаллизатором (асбестом, глиной);
- покрытие внутренней поверхности стенок кристаллизатора слоем смазки (солидол, парафиновая, графитовая смазка), засыпка на головку затравки охладителя (металлическая сечка).

Подготовка кристаллизатора МНЛЗ к разливке схематично показана на рисунке 38.

Далее, нагретый до 1200°С промежуточный ковш в заданное положение над кристаллизатором, а сталеразливочный ковш устанавливают на поворотный стэнд. Осуществляют подачу воды на кристаллизатор и ЗВО.

Разливка стали начинается с открытия шиберного затвора сталеразливочного ковша. Подача металла из сталеразливочного в промежуточный ковш осуществляется, как правило, через огнеупорную защитную трубу. После заполнения проковша металлом до уровня 500-600 мм (40-50 % его номинальной емкости) начинается подача стали в кристаллизатор. Длительность заполнения кристаллизатора до начала вытягивания заготовки должна обеспечить образование достаточно толстой корки затвердевшего металла и ее прочное сцепление с головкой затравки. Для заготовок среднего и крупного сечений это время составляет 1-2 мин.

По истечении заданного времени при неполностью заполненном кристаллизаторе, включают механизм вытягивания заготовки; одновременно автоматически включается механизм качания кристаллизатора. В течение 5-10 мин скорость вытягивания заготовки повышают до заданного (рабочего) значения. В дальнейшем ее стараются поддерживать постоянной во избежание образования дефектов в НЛЗ.

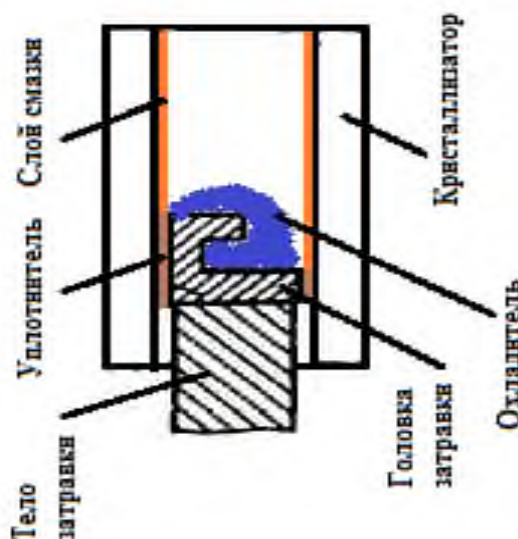


Рисунок 38 – Схема подготовки кристаллизатора МНЛЗ к разливке

Рабочую скорость разливки подбирают опытным путем, учитывая, что при ее увеличении возрастает производительность установки, но уменьшается толщина корки НЛЗ на выходе из кристаллизатора, а также повышается осевая рыхлость. Скорость разливки зависит от сечения заготовки, марки разливаемой стали, состояния оборудования МНЛЗ, обычно понижаясь при увеличении сечения НЛЗ и степени легирования стали. Для заготовок толщиной более 200 мм скорость разливки находится в пределах 0,4-2,0 м/мин, для более мелких заготовок достигает 3-8 м/мин.

В процессе разливки кристаллизатор совершает возвратно-поступательные движения, что предотвращает прилипание твердой корочки заготовки к поверхности кристаллизатора. Уровень металла в кристаллизаторе поддерживается постоянным, что стабилизирует процесс формирования кристаллизации.

Разливка металла может одновременно осуществляться на 1-4 ручьях для слябовых МНЛЗ и на 4-8 ручьях для блюмовых и сортовых МНЛЗ. Выбор количества ручьев осуществляется из соображений обеспечения требуемой скорости разливки (q , т/мин), которую можно определить по формуле:

$$q = N \cdot a \cdot b \cdot \rho \cdot W,$$

где a и b – толщина и ширина заготовки, м;

W – скорость вытягивания заготовки, м/мин;

ρ – плотность стали (7,6 т/м³);

N – количество ручьев, шт.

После выхода из кристаллизатора заготовка проходит через зону вторичного охлаждения (ЗВО), протяженность которой может составлять до 40 м в зависимости от условий разливки (сечение заготовки, марка стали, скорость разливки и пр.). При этом протяженность участка, на котором заготовка полностью затвердевает, то есть глубина жидкой лунки, не должна превышать металлургической длины МНЛЗ. Глубина лунки жидкого металла ($L_{ж}$, м) определяется по формуле:

$$L_{ж} = W \cdot \tau_3,$$

где W – скорость вытягивания заготовки, м/мин;

τ_3 – продолжительность затвердевания заготовки, мин.

Продолжительность затвердевания (τ_3 , мин) определяется по формуле:

$$\tau_3 = K_{\phi} \cdot \left(\frac{a}{2 \cdot k} \right)^2,$$

где a – толщина заготовки, мм;

K_f – коэффициент формы заготовки, который линейно изменяется от 0,75 для заготовки с отношением ширины к толщине $b/a = 1$ до 1 при отношении $b/a \geq 2$;

k – коэффициент затвердевания, $\text{мм/мин}^{1/2}$.

После выхода из ЗВО заготовка проходит тянуще-правильную клеть, затем производится отделение затравки и заготовка подается на машину газовой резки, где она режется на мерные длины и затем маркируется. Отрезанная мерная заготовка (как правило, 6-12 м) транспортируется к устройству поперечной транспортировки заготовок, где передается на холодильник, а далее транспортируется в цеха обработки металлов давлением.

Разливка стали осуществляется сериями из нескольких сталеразливочных ковшей (8-25 ковшей и более). Серийность разливки обеспечивает значительное повышение производительности, а также увеличение выхода годного металла. При этом замена пустого сталеразливочного ковша на полный осуществляется устройством для быстрой смены ковшей поворотного или мостового типа. Эта операция называется «перековшовка». Время замены сталеразливочного ковша составляет, как правило, 90-120 секунд. В это время разливка продолжается в обычном режиме (или с уменьшением скорости вытягивания заготовки) за счет металла, находящегося в промковше.

Регулирование расхода стали, вытекающей из промковша в кристаллизатор, осуществляется посредством изменения положения стопора относительно стакана-дозатора в промковше. Поддержание постоянного уровня металла в промковше обеспечивается корректировкой степени открытия шиберного затвора сталеразливочного ковша. При этом, для обеспечения заданной производительности МНЛЗ важно правильно подобрать диаметр разливочных стаканов сталеразливочного и промежуточного ковшей.

Диаметры каналов стаканов в сталеразливочном и промежуточном ковшах вычисляются из выражения:

$$q = k_p \cdot d^2 \cdot \sqrt{h},$$

где q – скорость разливки, т/мин

k_p – коэффициент скорости разливки, т/(мин·мм²·м^{0,5});

d – диаметр канала стакана, мм;

h – высота слоя жидкого металла в ковше, м.

Расчет диаметров каналов стаканов и в сталеразливочном, и в промежуточном ковшах ведется на максимальную скорость разливки, причем при рас-

чете диаметра канала стакана сталеразливочного ковша необходимо учитывать подачу жидкого металла одновременно в несколько кристаллизаторов (количество ручьев МНЛЗ). При расчете диаметра канала для сталеразливочного ковша рекомендуется принимать $k_p = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ т}/(\text{мин} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{1/2})$ и минимальный остаточный уровень металла $h = 0,2-0,3 \text{ м}$, а для промежуточного ковша $k_p = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ т}/(\text{мин} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{1/2})$ и рабочий уровень металла $h = 0,8-1,2 \text{ м}$.

Металл в кристаллизатор подают либо открытой струей (рисунок 39, а), либо «под уровень» с помощью удлиненных составных стаканов, конец которых погружен в металл на глубину 50-100 мм (рисунок 39, б, в). Подачу «под уровень» осуществляют вертикальной (рисунок 39, б), либо горизонтальными или наклонными струями (рисунок 39, в). Разливка под уровень предотвращает окисление и разбрызгивание струи металла и уменьшает его охлаждение, снижает пораженность заготовки поверхностными продольными трещинами. Подачу вертикальными струями применяют при отливке заготовок, близких по сечению к кругу или квадрату; подачу через погружаемые стаканы с боковыми отверстиями - для плоских заготовок.

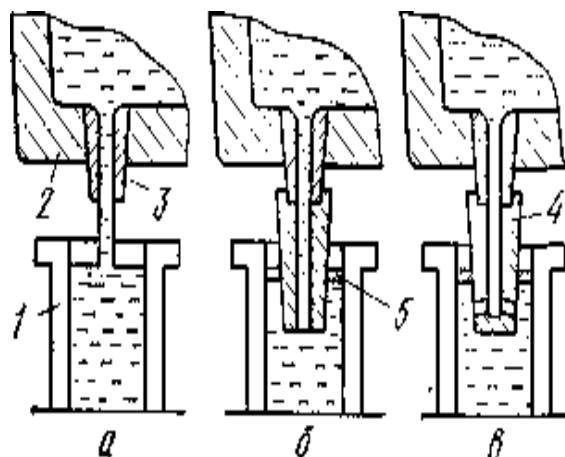


Рисунок 39 – Способы подачи металла в кристаллизатор (обозначения в тексте)

При разливке стали открытой струёй (без подачи в кристаллизатор шлаковых смесей) на стенки кристаллизатора подают смазку, продукты сгорания которой (сажа), налипая на стенки кристаллизатора уменьшают трение заготовки о стенки, способствуя предотвращению зависания и разрывов корки НЛЗ. В качестве смазки часто используют парафин и рапсовое масло, расход парафина составляет 0,2-0,7 кг/т стали. При сгорании смазки создается восстановительная атмосфера, что уменьшает окисление поверхности металла; для защиты от окисления в кристаллизаторе и вокруг струи создают защитную атмосферу путем подачи аргона, азота, природного газа, пропана.

При разливке через погружаемые стаканы поверхность металла в кристаллизаторе защищают от охлаждения, окисления и возможного образования заворотов окисленной корки шлаковыми покрытиями. В кристаллизатор на зеркало металла вводят шлакообразующие смеси (ШОС), которые, соприкасаясь с жидким металлом, расплавляются, образуя слой жидкого шлака. Состав смесей отличается разнообразием, в них могут входить CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaF_2 , MgO , иногда 20-30 % порошкообразного графита. ШОС должна быть легкоплавкой с температурой плавления 1050-1300 °С. При разливке со шлако-

вым покрытием смазку в кристаллизатор не подают – роль смазки выполняет тонкий слой шлака, налипающего на стенки кристаллизатора. Он же, заполняя газовый зазор между кристаллизатором и стенкой НЛЗ, выравнивает теплоотвод как по высоте, так и по сечению заготовки.

Расположенная на зеркале металла ШОС под воздействием тепла жидкой стали образует три ярко выраженных слоя: *жидкий слой*, расположенный непосредственно зеркале стали; *размягченный* (спеченный) слой, расположенный над жидким слоем, который по мере расходования жидкого слоя подпитывает его; *порошкообразный* слой, расположенный над размягченным слоем, который уменьшает отвод тепла через зеркало металла.

Главным условием безаварийной разливки является формирование в кристаллизаторе достаточно толстой и прочной корочки. Для контроля за динамикой формирования корочки современные кристаллизаторы оборудуют системами раннего распознавания прорывов (СРРП). Принцип работы таких систем основывается на замере температуры внутренней поверхности рабочих стенок кристаллизатора в двух-трех уровнях по его высоте посредством специальных термопар (рисунок 40). Количество и расположение термопар зависит от конфигурации кристаллизатора и максимальной скорости разливки.

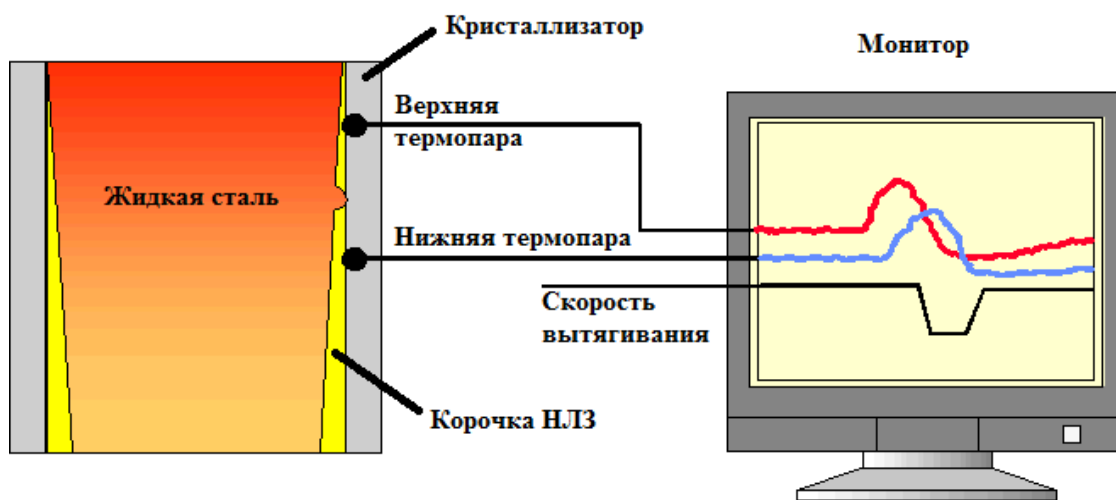


Рисунок 40 – Схема индикации возможного прилипания (прорыва) по показаниям термопар

Работа СРРП базируется на сравнении показателей величины разности температур от двух термопар, расположенных одна над другой. При этом температура поверхности заготовки в области разрыва корочки несколько выше, чем в прилегающих зонах, что провоцирует возникновение трещин в твердой корочке. В случае обнаружения прорыва корочки на некоторое время снижается скорость вытягивания заготовки, что позволяет залечить место прорыва. На практике такие системы обеспечивают снижение аварийных ситуаций, связанных с прорывом металла под кристаллизатором в несколько раз.

Завершение процесса разливки осуществляется прекращением выпуска металла из сталеразливочного, а затем из промежуточного ковша. При этом в промковше остается определенный остаток жидкого металла (высота слоя 200-300 мм), который препятствует попаданию шлака из промковша в кристаллизатор. После прекращения подачи металла из промковша движение заготовки приостанавливается, что позволяет «застудить» верхнюю часть заготовки с целью предотвращения выливания металла через край (на радиальных и криволинейных МНЛЗ). С этой целью с зеркала металла в кристаллизаторе удаляется шлак и на него подается вода. Далее заготовка продолжает свое движение и полностью выводится из МНЛЗ.

Продолжительность разливки плавки определяется из выражения:

$$\tau_{\text{разл}} = \frac{M_{\text{ст}}}{q},$$

где q – суммарная скорость разливки по всем ручьям, т/мин;

$M_{\text{ст}}$ – масса стали в сталеразливочном ковше, т.

Перечень условий эффективной непрерывной разливки стали.

1. Во время разливки уровень металла в кристаллизаторе должен поддерживаться примерно на 100 мм ниже верхней кромки кристаллизатора (недолив) с допуском в ± 3 мм. Более значительные колебания уровня дестабилизируют условия формирования корочки и вызывают ухудшение качества поверхности заготовки.

2. При разливке «под уровень» через погружной стакан под слоем шлакообразующей смеси выходное отверстие стакана должно быть погружено примерно на 50-100 мм, чтобы воспрепятствовать подсосу шлака. Для продления срока работы стакана необходимо менять его положение в диапазоне 50-100 мм через каждые 30-60 минут разливки (во избежание повышенной эрозии стакана в зоне ШОС).

3. При разливке открытой струей необходимо удалять окислительный шлак с зеркала металла, а также брызги стали с поверхности стенок кристаллизатора выше зеркала металла.

4. При подаче металла в кристаллизатор нельзя допускать перерывов струи и резкого изменения напора струи. Перерыв струи ведет к образованию спаев (поясов) на заготовке. Изменение расхода металла вызывает колебания уровня металла в кристаллизаторе и появление ужимин на поверхности НЛЗ.

5. Недопустимо попадание значительных количеств ковшевого шлака в промежуточный ковш, что повышает вероятность загрязнения НЛЗ неметаллическими включениями, а также ухудшает свойства покровного шлака в пром-

ковше. Поскольку при использовании защитных труб появление шлака визуально определить невозможно, то для определения момента его появления применяют различные методы (электромагнитный, гравиметрический) или прекращают разливку стали из стальковша при некоторой остаточной массе стали, соответствующей уровню металла в 200-300 мм, при котором происходит затягивание шлака в разливочный стакан.

Основные потери металла при непрерывной разливке стали:

- обрезь с головной частью заготовки (0,4-0,5 м);
- обрезь с хвостовой части заготовки из-за усадки (2-3 м);
- остаток металла в промковше после разливки («козел» до 5-10 тонн);
- вырезка по погружному стакану в случае его замены (0,4-0,6 м);
- потери с окалиной при газовой порезке – до 0,2% от массы разливаемой стали.

6.3 Контрольные вопросы для самопроверки

1. Укажите преимущества и недостатки МНЛЗ с вертикальным расположением технологической оси.
2. Укажите основные преимущества и недостатки МНЛЗ с радиальным и криволинейным расположением технологической оси.
3. Какими соображениями руководствуются при выборе базового радиуса технологической оси радиальной МНЛЗ?
4. Каким преимуществом характеризуются криволинейные МНЛЗ в отличие от радиальных?
5. Какими преимуществами обладают вертикально-радиальные и вертикально-криволинейные МНЛЗ в сравнении с радиальными и криволинейными?
6. Укажите оптимальную температуру перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ, при котором обеспечиваются наиболее благоприятные условия формирования непрерывнолитой заготовки.
7. Укажите допустимый перепад температур металла в промежуточном ковше.
8. Укажите требуемую величину перегрева стали в сталеразливочном ковше над температурой ликвидус.
9. Укажите верхний предел содержания серы и фосфора в стали, разливаемой на МНЛЗ.
10. Укажите требования непрерывной разливки по содержанию водорода в стали.
11. Перечислите основные технологические операции непрерывной разливки стали.

12. Исходя из каких соображений выбирается продолжительность наполнения кристаллизатора (в начале разливки) до начала вытягивания первых метров НЛЗ?
13. В какой момент начала разливки включается механизм качания кристаллизатора?
14. За счет чего в первую очередь следует обеспечивать достижение заданной скорости разливки и производительности МНЛЗ?
15. Как изменяется толщина корочки заготовки на выходе из кристаллизатора, и осевая рыхлость при увеличении скорости вытягивания НЛЗ?
16. Укажите основные параметры, определяющие скорость разливки стали (т/мин) через один ручей.
17. От чего зависит глубина жидкой лунки?
18. Укажите главный фактор, определяющий продолжительность затвердевания непрерывнолитой заготовки при оптимальных температурных условиях разливки.
19. Какими преимуществами обладает серийная разливки стали методом «плавка на плавку»?
20. Укажите основные параметры, определяющие продолжительность разливки плавки.
21. С какой целью при непрерывной разливке стали используют погружные стаканы?
22. С какой целью применяют шлакообразующие смеси в кристаллизаторе
23. На чем основана работа систем раннего распознавания прорывов?
24. Какими последствиями сопровождается прекращение подачи металла в кристаллизатор во время разливки и резкое изменение напора струи?
25. Что необходимо учитывать при выборе диаметра канала разливочного стакана стальковша?
26. Что необходимо учитывать при выборе диаметра канала разливочного стакана промковша?

Тема 7 Качество непрерывнолитой заготовки и направления совершенствования непрерывной разливки

7.1 Качество непрерывнолитой заготовки

Кристаллическая структура НЛЗ схожа со структурой слитков, полученных разливкой в изложницы – наружная корка из мелких неориентированных кристаллов (ее толщина от 2-3 до 5-10 мм), далее столбчатые кристаллы и в осевой части заготовки различно ориентированные крупные равноосные кристаллы. В НЛЗ мелкого сечения (до 100 мм) зона столбчатых кристаллов может простираться до центра заготовки.

НЛЗ благодаря малой толщине и быстрому вследствие этого затвердеванию отличается меньшим развитием химической неоднородности, более равномерным распределением неметаллических включений. От слитков, разливаемых в изложницы, она отличается также более чистой и гладкой поверхностью.

Ниже перечислены основные дефекты НЛЗ, получаемых непрерывной разливкой.

Осевая пористость (рыхлость) – скопление крупных и мелких пор вдоль теплового центра кристаллизации заготовки в зоне встречи фронтов затвердевания (рисунок 41). Этот дефект получает повышенное развитие в связи с наличием в кристаллизующейся заготовке очень глубокой и узкой лунки жидкого металла. Образование в ней «моста» сросшихся кристаллов может привести к появлению больших по протяженности зон, в которых металл кристаллизуется без доступа жидкой стали сверху, и, следовательно, к появлению пустот. Особенно сильно осевая пористость проявляется в квадратных и круглых заготовках; в слябовых заготовках она развита слабее, так как усадка металла здесь рассредоточена по продольной оси поперечного сечения НЛЗ. Осевая пористость заметно усиливается при увеличении перегрева металла и повышенной скорости вытягивания НЛЗ, иногда переходя в осевую трещину. Дефект исчезает при большой степени обжатия и не вызывает нежелательных последствий.



Рисунок 41 – Макрофотография дефекта «Осевая рыхлость»

Заметно выражена в непрерывнолитых заготовках **осевая ликвация** (осевая

химическая неоднородность) – повышенная концентрация ликвирующих примесей в сердцевине заготовки. На темплетях (рисунок 42) наблюдается в виде скопления отдельных точек повышенной травимости в центральной части заготовки.



Рисунок 42 – Серный отпечаток продольного сечения НЛЗ с осевой ликвацией

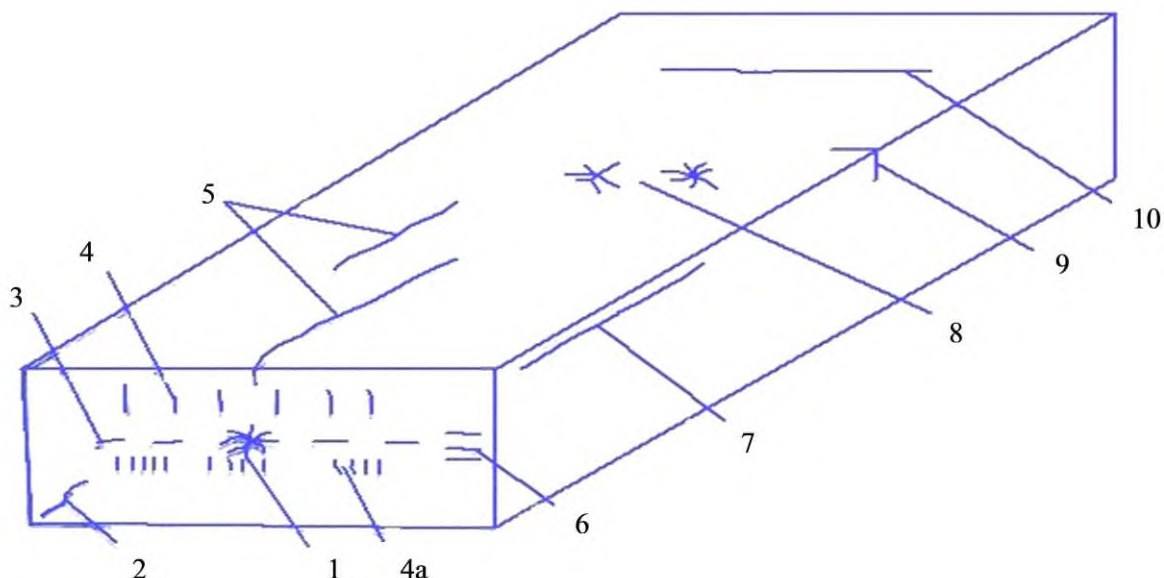
Осевая химическая неоднородность возникает вследствие явления «избирательной кристаллизации» и наличия конвективных потоков в незатвердевшей части заготовки. Чем шире температурный интервал кристаллизации сплава и больше длительность затвердевания (толщина заготовки), тем большее развитие получает ликвация. Снижению развития осевой неоднородности способствует разливка стали с минимальной температурой перегрева 10-15°C и пониженное содержание ликватов в стали (главным образом серы и фосфора). Осевая химическая неоднородность непрерывнолитой заготовки при прокатке не устраняется.

В заготовках криволинейных и особенно горизонтальных МНЛЗ наблюдается *несимметричность структуры* и распределения составляющих стали, поскольку зона затвердевания последних порций металла, а следовательно, и усадочная пористость, и скопление ликвирующих примесей смещены к верхней грани НЛЗ. У верхней грани наблюдается также повышенное содержание неметаллических включений вследствие их всплывания.

Одним из дефектов НЛЗ является *искажение формы*. Для НЛЗ квадратного сечения характерна *ромбичность*, которая может формироваться из-за неравномерного охлаждения граней НЛЗ или на входе в ЗВО при несоосно расположенных относительно кристаллизатора опорных роликов. Для слябовой заготовки искажения профиля проявляется в виде *раздутия заготовки* (выпуклость его поперечного сечения), которое возникает под воздействием ферростатического давления столба жидкой стали. Возникновению дефекта способствуют:

- недостаточная прочность затвердевшей корки из-за повышенной скорости разливки и/или повышенной температуре разливаемого металла;
- недостаточная интенсивность вторичного охлаждения;
- отклонения в настройке опорных роликов;
- увеличенное расстояние между опорными роликами.

Распространенным дефектом являются трещины – поверхностные и внутренние (рисунок 43).



1 – центральная трещина; 2 – диагональные трещины; 3 – осевые трещины (осевая пористость); 4 – внутренние трещины перпендикулярные широким граням НЛЗ; 5 – продольные поверхностные трещины на гранях НЛЗ; 6 – трещины, перпендикулярные узким граням НЛЗ; 7 – продольные трещины по ребрам (углам); 8 – паукообразные и сетчатые трещины; 9 – поперечные трещины в углах НЛЗ; 10 – поперечные поверхностные трещины (надрывы корки)

Рисунок 43 – Расположение трещин в непрерывнолитой заготовке

Образование трещин в НЛЗ может быть вызвано различными причинами:

- низкой пластичностью и прочностью затвердевшего слоя при высоких температурах;
- металлургическими особенностями процесса кристаллизации;
- ферростатическим давлением, которое испытывает твердая оболочка заготовки;
- температурными напряжениями;
- трением при вытягивании заготовки;
- механическими нагрузками при изгибе-разгибе и пр.

В итоге, трещины образуются при условии, когда суммарные нагрузки на затвердевшую корочку превышают её прочность.

При существенном развитии осевой рыхлости и химической неоднородности в центральной части заготовки может образовываться **осевая трещина**. Осевые трещины (рисунок 44) в слябах располагаются по их большой оси в зоне смыкания фронтов кристаллизации. Осевая трещина представляет собой нарушение сплошности центральной зоны непрерывнолитой заготовки в виде из-

вилистой трещины и имеет ширину раскрытия от 0,05 до 0,30 мм. Эти трещины образуются в результате усадки стали, если она не компенсируется сжимающим усилием опорных роликов.

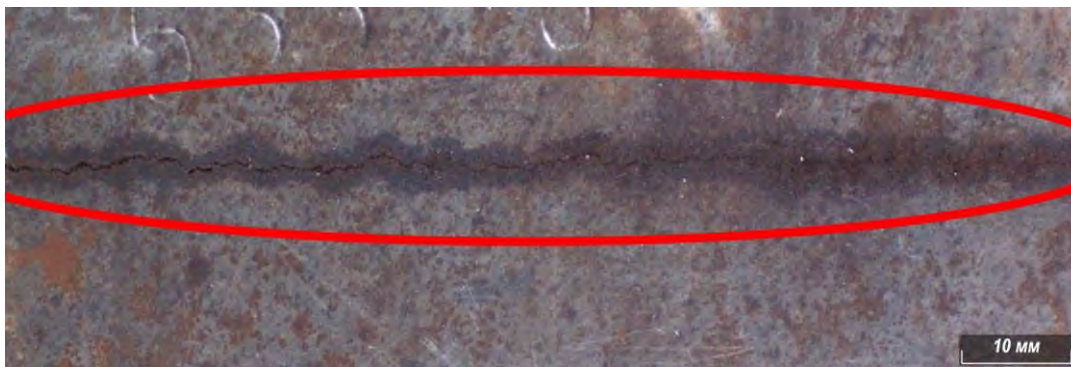


Рисунок 44 – Макроструктура дефекта «осевая трещина»

Продольные поверхностные трещины на гранях заготовки имеют длину до 1-1,5 м и более и глубину до 10-15 мм (рисунок 45). Эти трещины являются результатом усадочных напряжений и образуются при неравномерном прилегании формирующейся корки к стенкам кристаллизатора в местах уменьшенной ее толщины, которые возникают из-за снижения теплоотвода там, где корка отходит от стенок.



Рисунок 45 – Макрофотография дефекта «Продольная трещина»

Вероятность возникновения продольных трещин повышается при перегреве стали и увеличении скорости разливки, при увеличении содержания серы в металле и снижении величины отношения $[Mn]/[S]$, при увеличении ширины заготовки и при содержании углерода в нелегированных сталях в пределах 0,18-0,25%. Действенным средством борьбы с этим дефектом является разливка с защитным шлаковым покрытием, поскольку образующаяся между коркой и

стенками кристаллизатора тонкая шлаковая прослойка существенно снижает неравномерность теплоотвода.

Продольные трещины по ребрам (углам) (поз. 7 на рисунке 43) образуются в квадратных заготовках при искажении профиля в кристаллизаторе. В слябах такие трещины возникают на расстоянии ~350 мм от уровня металла в кристаллизаторе в случае отхода корки заготовки от узкой стенки кристаллизатора вследствие ее износа или изменения угла ее наклона (неправильная установка кристаллизатора).

Поперечные поверхностные трещины (рисунок 46) (надрывы корки) появляются под действием растягивающих напряжений вдоль оси НЛЗ, превышающих предел прочности стали. Поперечные трещины возникают в кристаллизаторе вследствие усиленного трения при недостаточной смазке стенок и вследствие зависания корки при наличии на стенках кристаллизатора царапин, вмятин. Такие трещины могут возникать также в результате механических напряжений, возникающих при изгибании или выпрямлении заготовки на МНЛЗ с криволинейной осью. Поперечные трещины в углах заготовки могут также образовываться в результате слишком интенсивного вторичного охлаждения на выходе заготовки из кристаллизатора, где охлаждение водой поверхности НЛЗ наиболее интенсивное.



а

б

Рисунок 46 – Поперечная трещина на поверхности заготовки (а) и угловая поперечная трещина (б)

Паукообразные и сетчатые трещины (рисунок 47) схожи, каждая трещина распространяется из одного центра в нескольких направлениях. **Паукообразные трещины** (расходящиеся от центра тонкие трещины в виде «звезды» или «паука») возникают в кристаллизаторе при неравномерном прилегании корки к его стенкам в местах плотного прилегания, т.е. в участках наиболее сильного охлаждения. Пораженность этими трещинами снижается при разливке со шлаковым покрытием в кристаллизаторе, так как шлаковая прослойка предотвращает непосредственный контакт стенок с коркой, уменьшая неравномер-

ность ее охлаждения. **Сетчатые трещины** (взаимно пересекающиеся небольшие извилистые трещины в виде сетки на рисунке 47) образуются в зоне вторичного охлаждения при температурах 800-900°С в результате чередования нагревов и охлаждений поверхности заготовки (охлаждение у форсунок и разогрев за счет внутреннего тепла заготовки при её движении между форсунками). Количество этих трещин сильно снижается при переходе от водяного к более мягкому водовоздушному вторичному охлаждению.



«Паукообразная трещина»



«Сетчатая трещина»

Рисунок 47 – Паукообразные и сетчатые трещины на поверхности НЛЗ

Многообразные **внутренние трещины** образуются в результате совместного воздействия термических напряжений в охлаждаемой заготовке и механических усилий от опорных, тянущих и изгибающих роликов. Распространены **внутренние трещины, перпендикулярные широким граням НЛЗ**. Основной причиной их возникновения считают механическое воздействие роликов на затвердевающую корочку заготовки и средством борьбы с ними – правильную настройку роликовой проводки и сохранение постоянства расстояния между роликами. Такие трещины могут также возникать из-за термических напряжений при неравномерном вторичном охлаждении.

Диагональные трещины (поз. 2 на рисунке 43) на стыке кристаллов, растущих от двух смежных граней, встречаются преимущественно в НЛЗ квадратного сечения при искажении профиля в тупых углах.

Трещины, перпендикулярные узким граням (поз. 6 на рисунке 43) и расположенные вблизи от них, возникают при выпучивании широких граней заготовки, то есть при недостаточном поддержании оболочки НЛЗ опорными устройствами.

Гнездообразные трещины (рисунок 48) – представляют собой разрывы металла в виде пересекающихся друг с другом лентообразных трещин. Причиной их образование являются усадочные напряжения внутренних слоев твердой оболочки, вызванные повышенными температурными градиентами по длине заготовки вследствие неправильной настройки вторичного охлаждения.



Рисунок 48 – Макрофотография дефекта «Гнездообразная трещина»

Одним из последствий развития внутренних трещин, перпендикулярным граням заготовки, является образование **ликвационных полосок** (рисунок 49) – трещины деформации, проходят через центр заготовки и направлены, в основном, перпендикулярно граням, образуются в случае значительного обжата заготовки при одновременном интенсивном вторичном охлаждении, при обжиге заготовок с незатвердевшей сердцевиной, а также в результате разгиба заготовок при высоких скоростях вытягивания и температуре металла. Образующиеся трещины в процессе затвердевания заготовки заполняются жидким металлом (из центральной части), обогащенным ликватами, поэтому при травлении на поверхности темплетта наблюдается чередование полосок различного химического состава.



Рисунок 49 – Травленный темплет с дефектом «Ликвационные полоски»

Точечная неоднородность – представляет собой точечные участки повышенной травимости по сечению темплета (рисунок 50). Дефект располагается преимущественно вблизи поверхности на малом радиусе широкой грани сляба и представляет собой групповые локальные скопления неметаллических включений. Образование дефекта связано с оставшимися в стали продуктами раскисления (оксидные включения) или с наличием эвтектических сульфидов марганца и железа.



Рисунок 50 – Макрофотография дефекта «Точечная неоднородность»

Газовые пузыри в корковом слое НЛЗ возникают при недостаточно раскисленном металле, высоком содержании в нем водорода, повышенном содержании влаги в защитной шлаковой смеси, вводимой в кристаллизатор.

Ряд поверхностных дефектов заготовки связан с неудовлетворительной организацией разливки. **Шлаковые включения** на поверхности возникают при заливке жидким металлом прилипающих к стенкам кристаллизатора частиц шлака или размытых огнеупоров. **Ужимины** (поперечные углубления на поверхности заготовки) возникают в результате резкого изменения напора струи и колебаний уровня металла в кристаллизаторе, при местном размывании корки струей металла и в участках неплотного прилегания корки к стенкам кристаллизатора.

7.2 Совершенствования техники и технологии непрерывной разливки

С целью повышения качества металла конструкцию МНЛЗ и технологию разливки непрерывно совершенствуют. Кроме обязательных операций по усреднению состава и коррекции температуры, применяют:

1. Защита металла от вторичного окисления и азотирования. Для предотвращения насыщения стали кислородом защищают струю металла, поступающего в промежуточный ковш, например, с помощью керамических труб, в полость которых подают аргон. С этой же целью на поверхности металла в про-

межуточном ковше создают защитные шлаковые покрытия, под крышку ковша вдувают аргон или азот.

2. Стабилизация уровня металла в промковше и кристаллизаторе. Разработано и применяется много разновидностей устройств для контроля уровня металла в кристаллизаторе и промежуточном ковше и автоматического поддержания постоянства этого уровня, что позволяет стабилизировать условия формирования корочки в кристаллизаторе и минимизировать опасность аварийных прорывов.

3. Совершенствование свойств и способов подачи шлакообразующей смеси (ШОС). Разрабатываются новые составы шлаковых смесей для защиты поверхности металла в кристаллизаторе с целью их удешевления и улучшения технологических свойств (способность выполнять роль смазки и поглощать всплывающие неметаллические включения, повышение защитных свойств, снижение температуры плавления и др.). Применяют устройства для автоматической подачи смесей в кристаллизатор.

4. Системы распознавания зависания НЛЗ в кристаллизаторе. Разработаны устройства для контроля сил трения между заготовкой и кристаллизатором. Сигнал об усилении трения свидетельствует об ухудшении смазки стенок кристаллизатора, т. е. об ухудшении свойств защитного шлакового слоя и о возможном зависании и разрыве корки заготовки.

5. Совершенствование режима качания кристаллизатора, которое направлено на увеличение частоты качания при снижении амплитуды

6. Электромагнитное перемешивание жидкой части затвердевающей заготовки широко применяется для воздействия на структуру затвердевающей корочки как в кристаллизаторе, так и в зоне вторичного охлаждения. Специальные индукторы, создающие бегущее магнитное поле и циркуляцию жидкого металла, устанавливают на кристаллизаторе или между опорными устройствами зоны вторичного охлаждения. Индукторы создают циркуляцию как в горизонтальной плоскости (вращение потоков вокруг оси НЛЗ), так и в вертикальной (вдоль оси НЛЗ). Перемешивание металла в зоне вторичного охлаждения препятствует росту столбчатых кристаллов, обеспечивая существенное увеличение зоны равноосных кристаллов, т. е. вызывает повышение равномерности и измельчение структуры. Значительно снижается также осевая пористость и осевая ликвация в НЛЗ. Электромагнитное перемешивание в кристаллизаторе часто применяют для улучшения чистоты поверхности заготовки. При этом создают: потоки вокруг оси НЛЗ, либо потоки, направленные на поверхности металла от стенок кристаллизатора к оси заготовки, что предотвращает затягивание шлаковых частиц между стенками кристаллизатора и затвердевающим металлом. Поверхность заготовки получается чистой от шлаковых включений.

7. Постоянно совершенствуется вторичное охлаждение НЛЗ путем опти-

мизации конструкции и расположение форсунок ЗВО. С целью предотвращения образования трещин и других дефектов добиваются плавного снижения температуры поверхности заготовки по её длине до требуемого для данной марки стали уровня в конце затвердевания (на 30-50°С выше температуры потери пластичности) при обеспечении одинаковой температуры по периметру заготовки.

8. Применяются устройства для контроля и регулирования зазора между опорными и тянущими роликами по ходу разливки с целью предотвращения образования внутренних трещин в НЛЗ. Существуют устройства аналогичного назначения, работа которых основана на измерении сил давления роликов на заготовку.

9. Применяется технология «мягкого обжатия» заготовки с жидкой сердцевиной в ЗВО, позволяющая компенсировать усадку стали и уменьшить осевую рыхлость (обжатие на 3-4 мм при толщине заготовки 200-300 мм), а также добиться более высоких степеней обжатия с целью уменьшения трудоемкости последующей прокатки.

10. Создание литейно-прокатных комплексов (ЛПК), то есть комплексов, в составе которых помимо МНЛЗ, работает прокатное оборудование, то есть обеспечивается разливка стали и прокатка не полностью остывших литых заготовок. Основная цель создания ЛПК – это создание непрерывного поточного производства, характеризующегося небольшими расходами энергии при подготовке заготовок к прокатке.

11. Развитие технологии непрерывного литья полосы.

7.3 Контрольные вопросы для самопроверки

1. Перечислите структурные составляющие поперечного сечения непрерывнолитой заготовки.
2. Что такое осевая рыхлость и каковы причины её образования?
3. Какие условия разливки способствуют развитию дефекта «осевая рыхлость»?
4. Что такое осевая химическая неоднородность и каковы причины её образования?
5. Какие условия разливки способствуют снижению развития дефекта «осевая химическая неоднородность»?
6. На МНЛЗ каких типов не наблюдается несимметричность поперечной структуры заготовки, проявляющаяся в смещении пористости, химической неоднородности и неметаллических включений в верхнюю часть НЛЗ?
7. Для какой заготовки наблюдается искажение формы в виде ромбичности?
8. Для какой заготовки наблюдается искажение формы в виде раздутия граней?

9. Укажите наиболее общую формулировку причин образования трещин в непрерывнолитой заготовке.
10. Что такое осевая трещина и каковы причины её образования?
11. В каком месте МНЛЗ наиболее вероятно образование продольной поверхностной трещины и почему?
12. В каком месте МНЛЗ наиболее вероятно образование поперечной поверхностной трещины и почему?
13. В каком месте МНЛЗ наиболее вероятно образование паукообразной трещины и почему?
14. В каком месте МНЛЗ наиболее вероятно образование сетчатой трещины и почему?
15. Какими последствиями сопровождается резкое изменение напора струи?
16. С какой целью при непрерывной разливке стали используют погружные стаканы и защитные трубы?
17. Что предусматривает технология «мягкого обжата» непрерывнолитой заготовки?
18. Для чего применяется электромагнитное перемешивание в технологии непрерывной разливки?
19. На что направлено совершенствование механизмов качания кристаллизатора?

Тема 8 Литейно-прокатные комплексы

8.1 Совмещение непрерывной разливки и прокатки

Одним из направлений совершенствования процессов производства проката в настоящее время является создание литейно-прокатных комплексов. В состав такого комплекса входят: машина непрерывного литья заготовок, устройства для передачи непрерывнолитой заготовки, печь для подогрева и непосредственно прокатный стан со всем технологическим оборудованием.

Литейно-прокатный комплекс – это комплекс, имеющий в своём составе МНЛЗ, прокатный стан и устройства (нагрев, охлаждение, смотка и др.), обеспечивающие прокатку не полностью остывших литых заготовок.

Основная цель создания ЛПК – это создание непрерывного поточного производства, характеризующегося минимальными расходами энергии при подготовке заготовок к прокатке. В состав ЛПК кроме МНЛЗ и прокатного стана может входить нагревательная (подогревательная) проходная печь.

При сооружении этих установок **используется принцип совмещенных процессов отливки и прокатки листовых заготовок большой длины**, то есть двух технологий – непрерывного литья заготовки и горячей прокатки. Схематически это можно представить следующим образом: непрерывное литье тонких заготовок → подогрев и выравнивание температуры → горячая прокатка → охлаждение, смотка. При таком варианте организации производства тонкой полосы достигается значительный энерго- и ресурсосберегающий эффект за счет сокращения технологической цепочки и исключения дополнительных циклов охлаждения и нагрева заготовки.

Основные преимущества ЛПК перед классической технологией «МНЛЗ – прокатка»:

- сокращение энергетических затрат на 30 % и более за счет использования теплосодержания НЛЗ;
- снижение радиуса изгиба более тонкой заготовки (от 50 до 100 мм) до 5-6 м, что существенно снижает габариты МНЛЗ и капитальные затраты на её сооружение;
- снижение степени развития ликвации в тонкой заготовке и измельчение структуры;
- повышение скорость вытягивания до 4-6 м/мин, что приближает скорость вытягивания заготовки к скорости прокатки;
- компактность ЛПК.

Создание ЛПК обычно сопряжено с **двумя проблемами** (на примере разливки НЛЗ среднего сечения 100-200 мм):

1. несоответствие скорости выхода заготовок из МНЛЗ (1,5-3,5 м/мин) и скорости входа в первую прокатную клетку (около 30 м/мин), и, как следствие, недогруженность почти в 10 раз прокатного стана при прямом совмещении с МНЛЗ;

2. отсутствие промежуточного контроля состояния поверхности и макроструктуры заготовок после МНЛЗ.

Решение первой проблемы обеспечивается:

– повышением до максимума по условиям кристаллизации скорости разливки;

– снижением скорости прокатки за счёт повышения степени деформации в первых прокатных клетках;

– переход на разливку заготовок меньшего сечения, характеризующихся большой скоростью разливки;

– использованием многоручьевых МНЛЗ.

Проблема отсутствия промежуточного контроля решается только за счёт повышения качества НЛЗ, для чего необходимо использовать самые передовые технические и технологические решения при непрерывной разливке и оперировать с металлом высокого качества.

Во всем многообразии конструкций ЛПК можно выделить

– **листовые литейно-прокатные комплексы**, состоящие из слябовых МНЛЗ и прокатного оборудования. Листовые литейно-прокатные комплексы начали сооружать в начале 90-х годов и в настоящее время их количество составляет более 1000 шт.;

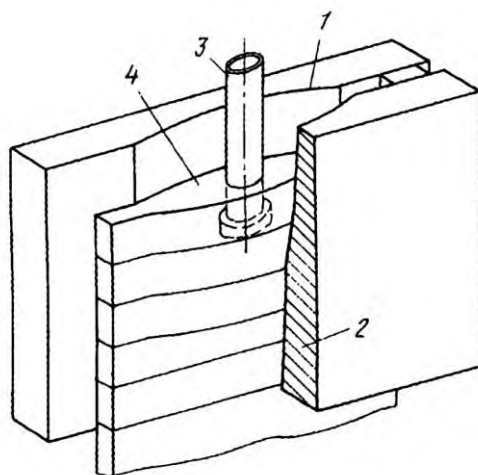
– **валковые (роторные) и ленточные ЛПК** для непосредственной отливки тонкой полосы с последующей её прокаткой.

8.2 Листовые литейно-прокатные комплексы

Существует большое количество конструкций листовых ЛПК. Они отличаются как по составу оборудования, так и по толщине сляба. Различают тонкослябовые (толщина отливаемого сляба 50-80 мм), среднеслябовые (100-150 мм) и толстослябовые (180-250 мм) ЛПК. В основном, в последнее время развитие получили тонкослябовые ЛПК. При сооружении этих установок используется принцип совмещенных процессов отливки и прокатки слябовых заготовок, т.е. двух технологий – непрерывного литья заготовки, поперечное сечение которой приближается по параметрам к размерам готового изделия, и прокатки тонкой полосы. Схематически это можно представить следующим образом: непрерывное литье тонких заготовок → разделение полосы → подогрев, выравнивание температуры → горячая прокатка → охлаждение, смотка.

Процесс совершенствования ЛПК можно разделить на этапы:

1). Установка CSP (Compact Strip Production - компактное производство полосы), разработанный немецкой фирмой «Schloeman-Siamag». Процесс предусматривает литье сляба толщиной 50 мм в воронкообразном кристаллизаторе (рисунок 51), прямую подачу сляба в нагревательную печь и в чистовую группу стана горячей прокатки с последующим охлаждением и смоткой полосы в рулон.



1 – приёмная заливочная воронка; 2 - формообразующая выпускная зона;
3 – погружной стакан; 4 – отливаемая заготовка

Рисунок 51 – Схема воронкообразного кристаллизатора

Отливаемый сляб в кристаллизаторе деформируется с изменением поперечного профиля от выпуклого до прямоугольного. Эта технология позволила отливать слябы толщиной 50 мм со скоростью вытягивания до 4-5 м/мин.

Технология CSP предусматривает мягкое обжатие валками полужатвердевшей заготовки непосредственно под кристаллизатором и получение тонкого сляба толщиной <35 мм, что позволяет уменьшить число клеток стана горячей прокатки и создать весьма компактное производство.

Для выравнивания температур по объёму сляба и для создания технологического буфера между МНЛЗ и прокатным станом используется проходная туннельная печь протяженностью до 220 м, позволяющая проводить обработку в потоке одновременно нескольких слябов длиной до 45-50 м и обеспечить независимую от МНЛЗ работу прокатного стана.

Технология CSP (рисунок 52): отливка тонкослябовой заготовки на МНЛЗ с воронкообразным кристаллизатором (формирование заготовки толщиной до 50 мм) и мягким обжатием под кристаллизатором с получением сляба толщиной <35 мм, порезка, подогрев в туннельной печи, непрерывная горячая прокатка, охлаждение и смотка.

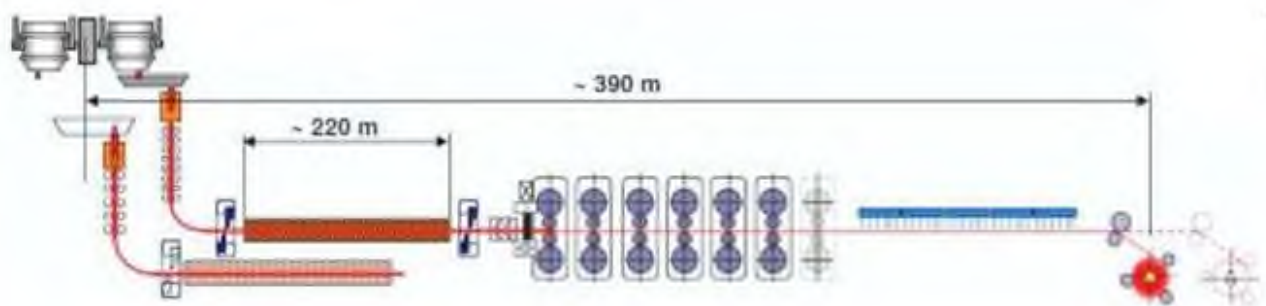
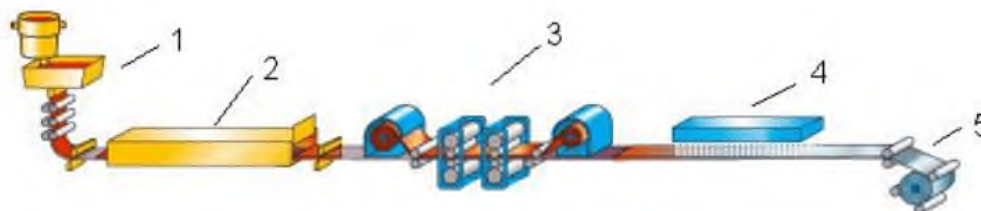


Рисунок 52 – Установка CSP (Compact Strip Production)

Поскольку скорость вытягивания слябовой заготовки не превышает 4-6 м/мин, что значительно меньше скорости прокатки, то для повышения степени загрузки прокатного стана на установках CSP обычно действует 2-х и 3-х ручьевые МНЛЗ.

Общими недостатками технологии CSP являются сложность воронкообразного кристаллизатора и большая дина ЛПК. Одним из удачных вариантов повышения компактности ЛПК является применение в технологии CSP реверсивного стана Стеккеля. На рисунке 53 представлена наиболее компактная и требующая наименьших капитальных вложений одноручьевая линия, снабженная реверсивной клетью с двумя печными моталками (так называемый «стан Стеккеля»).



- 1 – МНЛЗ; 2 – проходная печь-накопитель; 3 – реверсивная клеть;
4 – участок охлаждения, 5 – моталка

Рисунок 53 – Одноручьевой агрегат типа CSP с реверсивной прокатной клетью

В таком стане полоса после первого прохода сматывается на моталку в печи, которая расположена за прокатной клетью. После прокатки всей длины раската, стан реверсируется, полоса разматывается с моталки и задается в другую моталку, которая расположена перед прокатной клетью. Далее процесс циклически повторяется.

2). Установка ISP (In line Strip Production – поточное производство полос), разработанная фирмой Mannesmann Demag (рисунок 54), предусматривает подачу металла в обычный сборный радиальный кристаллизатор через особоплоский погружной стакан с получением на выходе сляба толщиной 60 мм. Непо-

средственно на выходе из кристаллизатора сляб с незатвердевшей сердцевинной подвергается обжатию до толщины 40-45 мм. После выхода из МНЛЗ слябы прокатываются в трехвалковой группе клеток HRM (High Reduction Mill) до толщины 13-17 мм. После чего раскат может убираться с линии, как готовый толстолистовой прокат, или поступать далее в проходную индукционную печь, после которой он сматывается печной моталкой, служащей буфером между черновой и чистовой группами клеток.

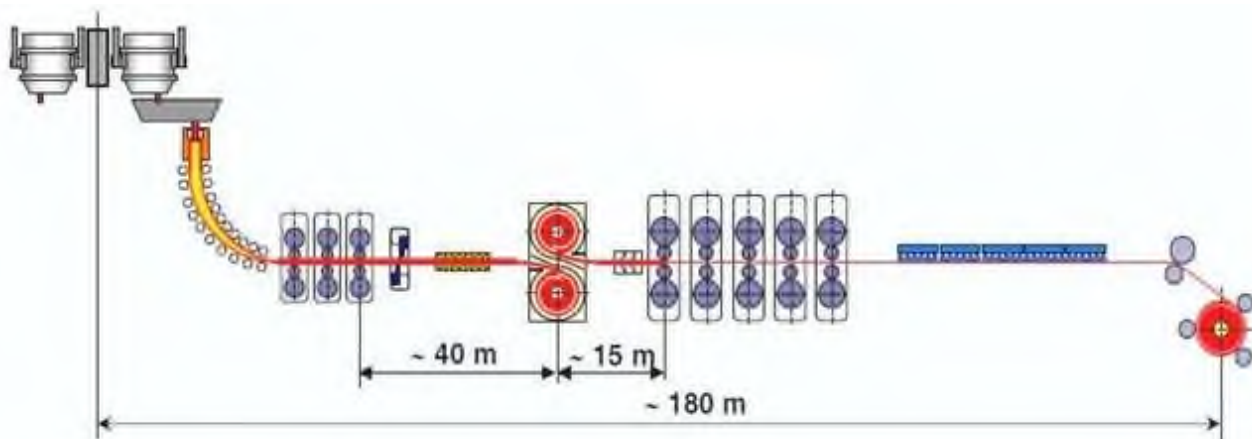


Рисунок 54 – Схема установки ISP (In line Strip Production)

Для получения тонколистовой стали подкат поступает в индукционный подогреватель. Далее подкат, подогретый до температуры прокатки, выдерживается в промежуточном перемоточном устройстве с подогревом (печной моталке), ожидая подачи в чистовую группу из пяти клеток для прокатки полос толщиной 1,5-3,0 мм.

Технология ISP: радиальный кристаллизатор (до 60 мм) с особоплоским стаканом, мягкое обжатие под кристаллизатором с получением сляба толщиной 40-45 мм, редуцирование в черновой группе клеток до 15-30 мм, порезка, подогрев в индукционной печи, выравнивание температуры в печной моталке, непрерывная чистовая прокатка с последующим охлаждением и смоткой.

К сравнительным достоинствам технологии ISP по сравнению с CSP относятся:

1. меньшая установочная длина МНЛЗ;
2. более высокая производительность прокатного оборудования, за счет возможности разделения потоков после черновой прокатки;
3. возможность дополнительного производства полосы для более толстых листов путем ответвления части потока металла после первой деформации;
4. меньшие энергозатраты.

Недостаток ISP по сравнению с CSP – более сложная настройка и повышенные эксплуатационные расходы.

3). Установка CPR (Casting-Pressing-Rolling), предусматривающая отливку слябов средней и промежуточной толщины с последующей горячей прокаткой. Процесс CPR по технологическим операциям похож на процесс CSP, поскольку предусматривает литье, обжатие, нагрев и прокатку.

К основным отличительным особенностям ЛПК CPR относятся:

1 Многоручьева МНЛЗ, позволяющая полностью загрузить непрерывный прокатный стан.

2 Кристаллизатор воронкообразного профиля для литья сляба толщиной до 100 мм. При этом сечение кристаллизатора в зоне мениска приближается к характерному для классических слябовых МНЛЗ – 200 мм. Благодаря большим размерам сечения заготовки уменьшаются эрозия стенок, захват шлакообразующей смеси в металл сляба, склонность к образованию поверхностных трещин и т.д.

3. Мягкое обжатия валками полужатвердевшей заготовки непосредственно под кристаллизатором с получением сляба толщиной <35 мм, что позволяет уменьшить число клетей стана горячей прокатки и создать весьма компактное производство.

4. Резка сляба на мерные длины, что позволяет проводить совмещение дальнейших операций.

5. Нагрев в туннельной печи.

6. Промежуточное перемоточное устройство, обеспечивающее практически одинаковую температуру по длине подката, что позволяет прокатывать тонкие полосы высокой точностью размеров и формы.

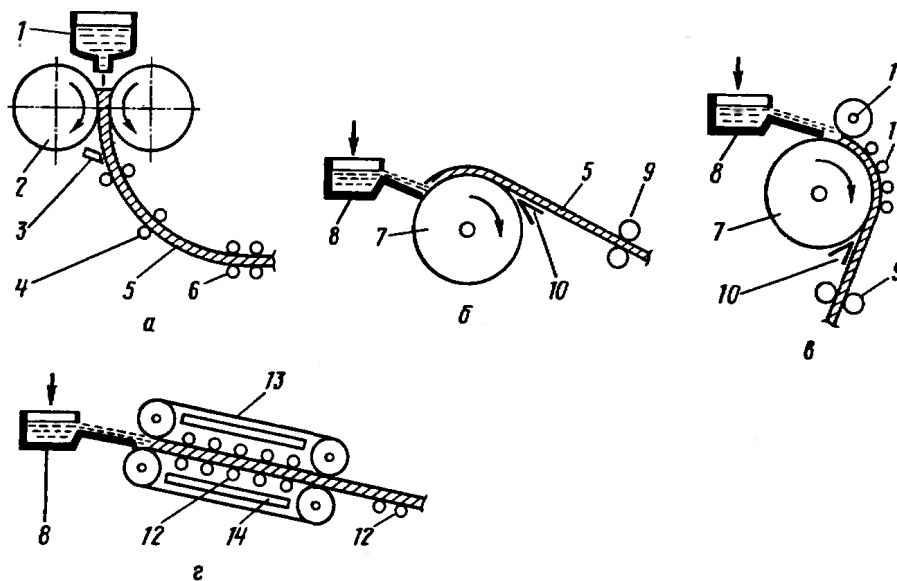
Таким образом, процесс CPR вобрал в себя все преимущества предыдущих конструкций, однако один недостаток остался – габариты.

Сравнение по разным показателям ЛПК с тонко- и среднеслябовыми МНЛЗ (производительность, качество металла, капитальные и эксплуатационные затраты и т.д.) показывает, что ЛПК с МНЛЗ для литья слябов средней толщины обеспечивают минимальные удельные капитальные затраты (по сравнению с тонкослябовыми МНЛЗ и слябами обычной толщины 150-300 мм).

8.3 Валковые (роликовые) и ленточные установки непрерывной отливки полосы

Патент на прямую отливку полосы с подачей металла в зазор между двумя вращающимися валками получен в 1866 г. Генри Бессемером. Особенно большое внимание прямой отливке полосы стало уделяться в последние 25 лет в Японии, Корее, США, Австралии, Австрии, Канаде, Китае, Франции и Германии. Было создано 45 промышленных, полупромышленных и опытных установок.

В подавляющем большинстве случаев это были роликовые машины той или иной конструкции (рисунок 55), и только единичные машины предусматривали подачу металла на движущуюся полосу (ленточные ЛПК).



а – двухвалковая; *б* – барабанного типа без ограничительного ролика;
в – барабанного типа с ограничительным роликом; *г* – двухленточная:

1 – промежуточный ковш; 2 – охлаждаемый валок; 3 – изгибающее устройство;
 4 – направляющие ролики; 5 – заготовка (полоса); 6 – выпрямляющие ролики;
 7 – охлаждаемый барабан; 8 – желоб; 9 – тянущие валки; 10 – снимающий клин;
 11 – ограничительный ролик; 12 – опорные ролики; 13 – лента;
 14 – охладитель ленты

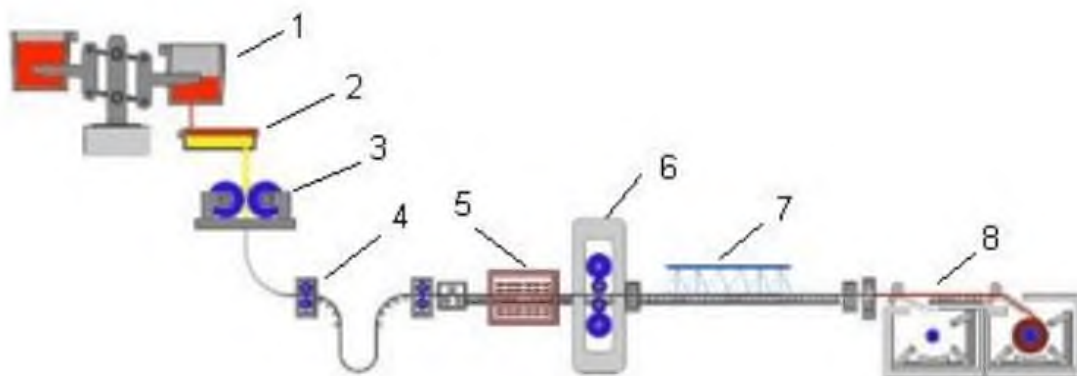
Рисунок 55 – Разновидности ЛПК для непрерывной отливки полосы

Технология прямой отливки полосы обладает многими преимуществами, но прежде всего она исключает такие операции традиционного процесса, как отливка и зачистка слябов, повторный нагрев и горячая прокатка. В результате значительно сокращаются капитальные вложения, связанные с оборудованием, и уменьшаются примерно **на 85 % энергозатраты** по сравнению с традиционной технологией.

Валковая разливка-прокатка является одной из наиболее перспективных и энергосберегающих технологий производства тонких полос. Данная технология позволяет отливать полосу максимально приближенную по толщине к готовому изделию, чем сокращает цикл производства и количество оборудования до минимума.

Получение тонкого и особо тонкого плоского проката заключается в формировании полосы непосредственно из жидкого металла путём одновременной кристаллизации и деформации его между двумя вращающимися валками с дальнейшим обжатием в прокатной клетке. Схема валкового ЛПК приведена на

рисунке 56.



1 – сталеразливочный ковш; 2 – промежуточный ковш; 3 – валковый кристаллизатор; 4 – тянущие ролики; 5 – индукционная печь; 6 – прокатная клеть; 7 – установка ускоренного охлаждения; 8 – моталки

Рисунок 56 – Схема валкового ЛПК

Жидкая сталь при разливке на валковой МНЛЗ поступает в пространство между валками и при контакте с поверхностью валков кристаллизуется, образуя корочки, которые двигаются вместе с поверхностью и выходят из валков в форме листа (рисунок 57), толщина которого определяется расстоянием между валками, а ширина – боковыми стенками кристаллизатора, которые могут сдвигаться относительно края бочки валков, тем самым обеспечивая нужную ширину. Максимальная ширина полосы в этом случае будет ограничиваться длиной бочки валков.

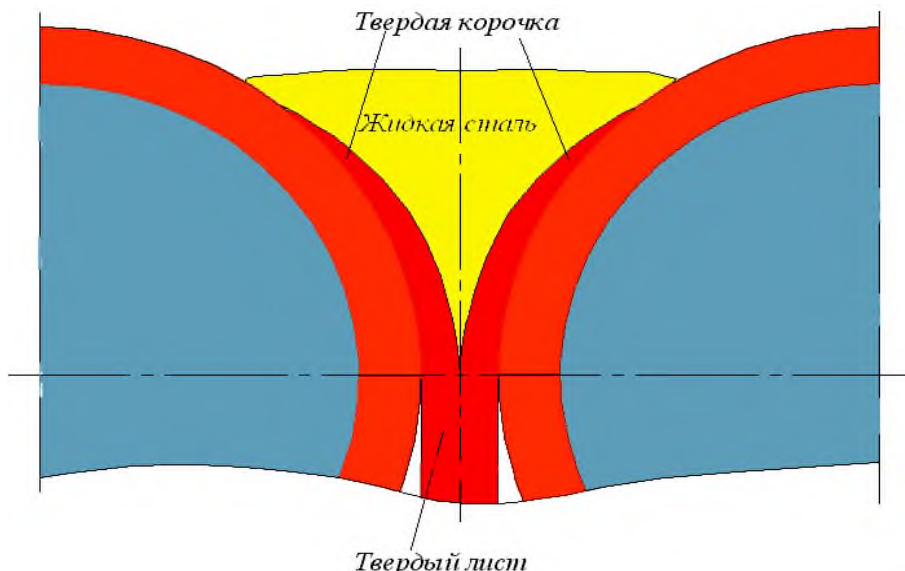


Рисунок 57 – Схема затвердевания полосы в валковом кристаллизаторе

Валки кристаллизатора изготавливаются из сплава меди с хромом и охлаждаются водой изнутри. После выхода из кристаллизатора полоса подается в индукционный подогреватель для выравнивания температуры по сечению и

прокатывается в прокатной клетке для получения меньшей толщины и уплотнения литой структуры. После установки ускоренного охлаждения готовая полоса сматывается в рулоны на моталке.

Технологическая схема получения тонкого листа с применением двухвалковых МНЛЗ имеет огромный потенциал в части экономии энергетических ресурсов (в 8-10 раз), снижения потерь с окалиной (в 40-50 раз), повышения производительности работы персонала (5-10 раз), снижения выбросов парникового газа (в 10-20 раз) при существенном снижении затрат на капитальное строительство.

Серьезную проблему представляет конструкция боковых стенок, которые должны удерживать жидкую сталь, предотвращая ее прорывы из кристаллизатора, и обеспечивать одинаковую температуру металла около стенок и в средней части кристаллизатора, чтобы исключить деформацию кромок листа. В качестве материала боковых стенок используют нитрид бора или кремния. Проводятся исследования по удержанию ванны жидкой стали с помощью электромагнитного поля.

Еще одна важная задача – получить лист заданной толщины. Расширение валков при нагреве приводит к уменьшению зазора. Если при отливке сляба толщиной 150 мм изменение ширины на 1 мм несущественно и при горячей прокатке исправимо, то при отливке 2-3 мм листа оно недопустимо. Следует, безусловно, избегать образования трещин и морщин на поверхности листа, так как при отливке тонкого листа трещина глубиной 1 мм может оказаться сквозной.

Для предотвращения образования трещин и обеспечения постоянства толщины листа необходимо поддерживать постоянным уровень стали в кристаллизаторе с точностью ± 1 мм и не допускать волнения поверхности расплава.

До промышленной реализации доведен ряд проектов. Один из наиболее масштабных и в наибольшей степени отработанных – Eurostrip, производительностью до 400 тыс. тонн в год полосового проката толщиной 1,5-4,5 мм и шириной – 1100 мм. Валковая МНЛЗ имеет следующие характеристики: диаметр валка – 1500 мм, скорость разливки – 60-100 м/мин (макс. – 150 м/мин), емкость промковша – 16 тонн, стальковша – 90 тонн. Продолжительность непрерывной разливки определяется сроком службы прижимных боковых плит-уплотнителей (ограничителей жидкой ванны) и составляет до 3-4 плавов. Расчетная стойкость никелевого покрытия роликов отвечает разливке 3-7 тыс.т стали в зависимости от толщины отливаемой полосы (30-80 плавов).

В целом же технология прямой отливки тонкого листа на двухвалковой МНЛЗ исключает такие операции традиционного процесса, как качание кристаллизатора, приводящее к образованию «следов» на поверхности, зачистку полупродукта, его повторный нагрев и прокатку. В результате этого значитель-

но сокращаются капитальные вложения, связанные с оборудованием, и уменьшаются энергозатраты (на 85%, по сравнению с традиционной технологией).

8.4 Контрольные вопросы для самопроверки

1. Что является основной целью создания литейно-прокатных комплексов?
2. Укажите основные проблемы, которые необходимо решать при производстве листового проката в потоке литейно-прокатного комплекса.
3. За счет чего достигается энерго- и ресурсосбережение при совмещении процессов разливки и прокатки в ЛПК?
4. Что из перечисленного относится к преимуществам ЛПК перед классической технологией «МНЛЗ – прокатка»?
5. Какие элементы технологии применяются на листовых ЛПК?
6. Каким способом невозможно решить проблему несоответствия скорости выхода заготовок из МНЛЗ и скорости прокатки?
7. С какими проблемами сталкиваются при разливке стали на валковых машинах непрерывной разливки?
8. Какими преимуществами обладает валковая технология прямой отливки полосы перед тонкослябовыми МНЛЗ?

Список использованных источников

- 1 Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Современная технология производства стали. – М.: Теплотехника, 2007. – 527 с.
- 2 Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: Учебник для вузов. – М.: «Мир», ООО «Издательство АСТ», 2003. – 528 с.
- 3 Чалмерс Б. Теория затвердевания. – М.: Metallurgia, 1968. – 280 с.
- 4 Журавлев В.А., Китаев Е.М. Теплофизика формирования непрерывного слитка. – М.: Metallurgia, 1974. – 216 с.
- 5 Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. – М.: Metallurgia, 1988. – 143 с.
- 6 Бровман М.Я. Непрерывная разливка металлов. – М.: «ЭКОМЕТ», 2007. – 484 с.
- 7 Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л. Процессы непрерывной разливки. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
- 8 Лякишев Н.П., Шалимов А.Г. Развитие технологии непрерывной разливки стали. – М.: ЭЛИЗ, 2002. – 208 с.
- 9 Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали: учебник. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
- 10 Паршин В.М. Буланов Л.В. Непрерывная разливка стали. – Липецк: ОАО «НЛМК». 2011. – 221 с.
- 11 Лехов О.С., Комратов Ю.С. Совмещенные процессы непрерывного литья и деформации для производства проката. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – 411с.
- 12 Литвин А.В., Мазур В.Л., Темошенко В.Л. Разработка литейно-прокатных комплексов для производства листовой стали, тонких слябов и лент за рубежом. // Черная металлургия, 1990. №4. С.23-31.

ШАПОВАЛОВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Учебное пособие

по дисциплинам «Разливка и кристаллизация стали», «Теория и технология разливки стали» для студентов направления подготовки 22.03.02 Metallurgy, обучающихся по профилю «Metallurgy of black metals», всех форм обучения

Подписано в печать 20.03.2024 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег. № 275	Печать цифровая Тираж 10 экз.	Уч.-изд.л. 8,0

ФГАОУ ВО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.

E-mail: nf@misis.ru

Контактный тел. 8 (3537) 67-97-29.