

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
ЮРГИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Валуев Д.В.

НЕПРЕРЫВНАЯ РАЗЛИВКА СТАЛИ И СПЛАВОВ

Допущено учебно-методическим объединением по образованию в области металлургии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150100 – Металлургия, специальность 150101 – Металлургия черных металлов

Издательство
Томского политехнического университета
2011

УДК
ББК

Валуев Д.В.

Непрерывная разливка стали и сплавов: учебное пособие / Н.А.Козырев, Р.А.Гизатулин, Д.В. Валуев; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 406с.

ISBN 978-5-98298-000-0

Изложены современные представления о процессах непрерывной разливки стали. Описаны основные типы машин непрерывного литья заготовок. Рассмотрены технологические узлы машин непрерывного литья заготовок. Приведены примеры современных технологий производства стали с применением разливки на машинах непрерывного литья заготовок.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 150100 Metallургия, а также для аспирантов, научных и инженерно-технических работников, специализирующихся в области технологии, проектирования, реконструкции и исследования процессов непрерывной разливки стали.

УДК
ББК

Рецензенты

Заведующий кафедрой «Теплофизики и промышленной экологии» ГОУ ВПО СибГИУ Кандидат технических наук, доцент
С.Г. Коротков

Заведующий кафедрой «Сопротивление материалов и строительная механика» ГОУ ВПО СибГИУ доктор технических наук, профессор
А.Г. Никитин

ISBN 978-5-98298-000-0 © Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета, 2010.
© Валуев Д.В., 2011.
© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2011.

Введение.....	6
Глава 1. Кристаллическое строение металлов.....	7
1.1. Металлы	7
1.2. Классификация металлов	9
1.3. Кристаллическое строение металлов	14
1.4. Кристаллические решетки металлов	17
1.5. Реальное строение металлических кристаллов.....	22
1.6. Анизотропия свойств кристаллов.....	29
Глава 2. Кристаллизация.....	31
2.1. Три состояния вещества.....	31
2.2. Энергетические условия процесса кристаллизации.....	33
2.3. Механизм процесса кристаллизации.....	36
2.4. Форма кристаллических образований.....	41
2.5. Превращения в твердом состоянии. Аллотропия.....	43
2.6. Магнитные превращения.....	47
Глава 3. Физико-химические и литейные свойства железоуглеродистых расплавов.....	49
3.1. Физико-химические свойства расплавов.....	49
3.2. Диаграмма состояния железо – углерод.....	55
3.3. Металлография стали и чугуна.....	58
Глава 4 Типы машин непрерывного литья заготовок.....	63
4.1. МНЛЗ вертикального типа.....	64
4.2. МНЛЗ горизонтального типа.....	68
4.3. Литейно-прокатные агрегаты.....	72
4.4. МНЛЗ для отливки профильных балочных заготовок.....	74
4.5. Центробежные МНЛЗ.....	75
4.6. МНЛЗ для отливки полых трубных заготовок.....	78
4.7. Машины полунепрерывной разливки стали (МПНРС).....	78
4.8. Тонкослябовые установки непрерывной разливки стали.....	81
4.9. Установки непрерывной отливки полосы.....	105
4.10. Проект SMS Demag MAIN AG/MTAG115.....	113
Глава 5. Основные технологические узлы МНЛЗ.....	132
5.1. Стенды сталеразливочных и промежуточных ковшей.....	132
5.2. Тележки и поворотные столы промежуточных ковшей.....	135
5.3. Промежуточные ковши и оптимизация их использования	136
5.3.1. Футеровка промежуточных ковшей.....	139
5.3.2. Подогрев стали в промежуточном ковше.....	149
5.4. Флотация и фильтрация неметаллических включений в промковшах.....	165

Глава 6. Погружные стаканы.....	176
6.1. Выбор химического состава стаканов.....	176
6.2. Специальные мероприятия по предотвращению зарастания стаканов.....	179
6.3. Новые приемы использования погружных стаканов для повышения эффективности разливки.....	180
Глава 7. Кристаллизаторы, их конструкция и механизмы качания.....	186
7.1. Конструктивные особенности кристаллизаторов для отливки слябов.....	188
7.2. Совершенствование конструкций кристаллизаторов и систем их ка- чания.....	193
7.3. Новые материалы для изготовления кристаллизаторов, совершенст- вование их конструкций.....	193
7.4. Механизмы качания кристаллизатора.....	211
7.5. Новые системы качания кристаллизатора.....	214
7.6. Конструктивные особенности кристаллизатора для отливки сорто- вых заготовок и блюмов.....	221
7.7. Уход за кристаллизатором и смазка стенок.....	225
7.8. Системы подачи флюсов в кристаллизаторы.....	227
7.9. Разделение непрерывного слитка на мерные заготовки.....	233
7.10. Затравки и механизмы их транспортировки.....	242
Глава 8. Усовершенствование конструкций поддерживающих систем в зоне вторичного охлаждения заготовки, обжатие заготовки с неполно- стью затвердевшей сердцевинной.....	249
8.1. Вторичное охлаждение непрерывного слитка.....	273
8.2. Форсунки и распределение охладителя по длине непрерывного слитка.....	286
8.3. Снабжение МНЛЗ водой и ее очистка.....	289
8.4. Поддерживающая система слитка в ЗВО.....	290
8.5. Тянущие, изгибающие и правящие клетки.....	299
Глава 9. Особенности процесса непрерывной разливки стали.....	309
9.1. Особенности формирования непрерывного слитка.....	309
9.2. Теплофизические условия затвердевания слитка в кристаллизаторе.....	311
9.3. Теплоотвод и затвердевание слитка в зоне вторичного охлаждения.....	319
9.4. Напряженное состояние оболочки при формировании слитка.....	324
9.5. Структура непрерывного слитка.....	326
9.6. Методы электромагнитного воздействия на кристаллизующийся металл.....	332
Глава 10. Основы технологии непрерывной разливки стали.....	350

10.1. Температурно-скоростной режим разливки.....	350
10.2. Условия подвода жидкого металла в кристаллизатор.....	355
10.3. Защита металла от вторичного окисления и тепловых потерь на пути в сталеразливочный ковш-кристаллизатор.....	357
10.4. Защита металла в кристаллизаторе.....	362
Глава 11. Характерные дефекты непрерывного слитка и способы их устранения.....	368
11.1. Горячие и холодные трещины.....	368
11.2. Шлаковые включения и газовые пузыри.....	370
11.3. Паукообразные и сетчатые трещины.....	373
Заключение.....	376
Список литературы.....	377
<i>Приложение А. Дефекты поверхности непрерывнолитой заготовки...</i>	<i>380</i>

Введение

Разливка является, ответственной операцией в производстве стали, оказывающей существенное влияние на структуру и поверхность слитков.

Сталь, наилучшим образом приготовленная в печи и удовлетворяющая всем требованиям как по химическому составу, так и по содержанию неметаллических включений и газов, может быть испорчена неправильно проведенной разливкой. Наоборот, правильно проведенной разливкой можно значительно улучшить качество стали.

Различные затруднения, возникающие при разливке, вызываются, главным образом, тем, что процесс разливки ограничен во времени довольно узкими пределами: его начинают при определенной для каждой марки стали температуре и заканчивают раньше, чем сталь в ковше успеет остыть до температуры, при которой ее жидкотекучесть становится недостаточной для получения слитков высокого качества.

Прежде чем попасть в изложницы, сталь проходит длинный путь. На своем пути она соприкасается с огнеупорными материалами желоба и ковша, а при сифонной разливке и с огнеупорами сифонного припаса.

При соприкосновении стали с огнеупорами, а также со шлаком в ковше сталь загрязняется неметаллическими включениями, дополнительно окисляется кислородом, попадающим в нее как из окружающего воздуха, так и из окислов шлака.

С давних пор разливку стали считали искусством и только опытным мастерам доверяли выполнение этой операции. Современные сведения о физико-химических процессах, протекающих во время разливки и при затвердевании черных металлов, позволяют воздействовать на жидкую сталь при ее кристаллизации в кристаллизаторах или в изложнице, руководствуясь точной информацией о температуре металла, его химическом составе и других свойствах, выполнять операции разливки на самом высоком технологическом уровне.

Для улучшения качества слитков широкое применение нашли способы внепечной обработки жидкого металла в ковше вакуумированием, продувкой инертными газами, обработкой синтетическими шлаками.

Для выполнения указанных воздействий на крупных металлургических заводах применяется сложное и разнообразное оборудование. Это значительно повышает требования к подготовке квалифицированных специалистов: разливщиков и литейщиков.

Глава 1. Кристаллическое строение металлов

1.1. Металлы

В огромном ряду материалов, с незапамятных времен известных человеку и широко используемых им в своей жизни и деятельности, металлы всегда занимали особое место.

Подтверждение есть и в названиях эпох (золотой, серебряный, бронзовый, железный века), на которые греки делили историю человечества: и в археологических находках металлических изделий (кованые медные украшения, сельскохозяйственные орудия); и в повсеместном использовании металлов и сплавов в современной технике.

Причина этого в особых свойствах металлов, выгодно отличающих их от других материалов и делающих во многих случаях незаменимыми.

В химии под металлами понимают определенную группу элементов, расположенную в левой части Периодической таблицы Д.И. Менделеева (табл. 1). Элементы этой группы, вступая в химическую реакцию с элементами, являющимися неметаллами, отдают им свои внешние, так называемые валентные электроны. Это является следствием того, что у металлов внешние электроны непрочно связаны с ядром; кроме того, на наружных электронных оболочках электронов немного (всего 1–2), тогда как у неметаллов электронов много (5–8). Все элементы, расположенные левее галлия, индия и таллия – металлы, а правее мышьяка, сурьмы и висмута – неметаллы.

Элементы, расположенные в группах IIIВ, IVВ и VВ, могут относиться и к металлам (In, Tl, Sn, Pb, Sb, Bi), и к неметаллам (C, N, P, As, O, S) и занимать промежуточное положение (Ga, Si, Ge, Se, Te).

В технике под металлом понимают вещества, обладающие «металлическим блеском», в той или иной мере присущим всем металлам, и пластичностью. По этому признаку металлы можно легко отличить от неметаллов, например дерева, камня, стекла или фарфора.

«Металлы суть светлые тела, которые ковать можно». Это определение металлов, данное М.В. Ломоносовым, не потеряло своего научного значения и теперь, через 250 лет. Этими свойствами обладают не только чистые элементы, например алюминий, медь, железо и др., но и более сложные вещества, в состав которых может входить несколько элементов-металлов часто с примесью заметных количеств элементов-неметаллов. Такие вещества называются *металлическими сплавами*. Следовательно, в более широком толковании металлические сплавы также могут быть названы металлами.

Кроме металлического блеска и пластичности, все металлы обладают высокой электропроводностью и теплопроводностью.

Из сказанного можно заключить, что имеется некоторое различие в понятиях металл как химический элемент и металл как вещество, но и то и другое определение обусловлено особенностями внутреннего строения атомов металлических веществ, которое одинаково у чистых металлов и у их сплавов.

Особенность строения металлических веществ заключается в том, что они все построены в основном из таких атомов, у которых внешние электроны слабо связаны с ядром. Это обуславливает и особый характер химического взаимодействия атомов металла, и металлические свойства. Электроны имеют отрицательный заряд, и достаточно создать ничтожную разность потенциалов, чтобы началось перемещение электронов по направлению к положительно заряженному полюсу, создающему электрический ток. Вот почему металлы являются хорошими проводниками электрического тока, а неметаллы ими не являются.

Характерным электрическим свойством металлов является также и то, что с повышением температуры у всех без исключения металлов электропроводность уменьшается.

При химическом взаимодействии между металлами и неметаллами внешние электроны от атомов металла переходят к атомам неметалла. Атом металла превращается при этом в положительный ион, а атом неметалла в отрицательный ион.

Итак, мы видим, что слабая связь наружных электронов с ядром обуславливает химические и физические свойства металлов.

В силу указанных выше особенностей металлы и их сплавы имеют следующее атомно-кристаллическое строение. В определенных местах кристаллической решетки располагаются положительно заряженные ионы, а наружные свободные электроны создают внутри металла как бы легкотекучую жидкость, или электронный газ, который беспорядочно движется во всех направлениях. При определенных условиях, например, при создании разности потенциалов, движение электронов получает определенное направление и возникает электрический ток.

Теория металлического состояния рассматривает металл как вещество, состоящее из положительно заряженных ионов, окруженных отрицательно заряженными частицами электронами, слабо связанными с ядром. Эти электроны непрерывно перемещаются внутри металла и принадлежат не одному какому-то атому, а всей совокупности атомов.

Таким образом, характерной особенностью атомно-кристаллического строения металлов является наличие *электронного газа* внутри металла, слабо связанного с положительно заряженными

ионами. Легкое перемещение этих электронов внутри металла и малая их связь с атомами обуславливают наличие у металлов определенных металлических свойств (высокая электро- и теплопроводность, металлический блеск, пластичность и др.).

1.2. Классификация металлов

Каждый металл отличается строением и свойствами от другого, тем не менее по некоторым признакам их можно объединить в группы (табл. 1.1).

Таблица 1.1

3 Li Литий	4 Be Бериллий																		
11 Na Натрий	12 Mg Магний	13 Al Алюминий																	
19 K Калий	20 Ca Кальций	21 Sc Скандий	22 Ti Титан	23 V Ванадий	24 Cr Хром	25 Mn Марганец	26 Fe Железо	27 Co Кобальт	28 Ni Никель	29 Cu Медь	30 Zn Цинк	31 Ga Галлий	32 Ge Германий	33 As Мышьяк					
37 Ru Рубидий	38 Sr Стронций	39 Y Иттрий	40 Zr Цирконий	41 Nb Ниобий	42 Mo Молибден	43 Tc Технеций	44 Ru Рутений	45 Rh Родий	46 Pd Палладий	47 Ag Серебро	48 Cd Кадмий	49 In Индий	50 Sn Олово	51 Sb Сурьма					
55 Cs Цезий	56 Ba Барий	57-71 Лантаноиды	72 Hf Гафний	73 Ta Тантал	74 W Вольфрам	75 Re Рений	76 Os Осмий	77 Ir Иридий	78 Pt Платина	79 Au Золото	80 Hg Ртуть	81 Tl Таллий	82 Pb Свинец	83 Bi Висмут					
87 Fr Франций	88 Ra Радий	89-103 Актиниды																	

←
→

Черные металлы
Цветные металлы

10

Щелочно-земельные металлы

Легкие металлы

Редкоземельные металлы

Урановые металлы

Тугоплавкие металлы

Благородные металлы

Легкоплавкие металлы

Железные металлы

Прежде всего все металлы можно разделить на две большие группы черные и цветные металлы.

Черные металлы имеют темно-серый цвет, большую плотность (кроме щелочноземельных), высокую температуру плавления, относительно высокую твердость. Наиболее типичным металлом этой группы является железо.

Цветные металлы чаще всего имеют характерную окраску: красную, желтую, белую. Обладают большой пластичностью, малой твердостью, относительно низкой температурой плавления, для них характерно отсутствие полиморфизма. Наиболее типичным металлом этой группы является медь.

Черные металлы, в свою очередь, можно подразделить следующим образом:

1. *Железные металлы*: железо, кобальт, никель (так называемые ферромагнетики) и близкий к ним по свойствам марганец. Кобальт, никель и марганец часто применяют как добавки к сплавам железа, а также в качестве основы для соответствующих сплавов, похожих по своим свойствам на высоколегированные стали.

2. *Тугоплавкие металлы*, температура плавления которых выше, чем железа (т. е. выше 1539°C). Применяют как добавки к легированным сталям, а также в качестве основы для соответствующих сплавов.

3. *Урановые металлы* – актиниды, имеющие преимущественное применение в сплавах для атомной энергетики.

4. *Редкоземельные металлы* (РЗМ): лантан, церий, неодим, празеодим и др., объединяемые под названием лантаноидов, и сходные с ними по свойствам иттрий и скандий. Эти металлы обладают весьма близкими химическими свойствами, но довольно различными физическими (температура плавления и др.). Их применяют как присадки к сплавам других элементов. В природных условиях встречаются вместе, и вследствие трудностей разделения на отдельные элементы для присадки обычно применяют «смешанный сплав», так называемый *мишметалл*, содержащий 40–45% Се и 45–50% всех других редкоземельных элементов. К таким смешанным сплавам РЗМ относят *ферроцерий* (сплав церия и железа с заметным количеством других РЗМ), *дидим* (сплав неодима и празеодима преимущественно) и др.

5. *Щелочноземельные металлы* в свободном металлическом состоянии не применяются, за исключением специальных случаев, например, в качестве теплоносителей в атомных реакторах.

Цветные металлы подразделяются:

1. *Легкие металлы*: бериллий, магний, алюминий, обладающие малой плотностью.

2. *Благородные металлы*: серебро, золото, металлы платиновой группы (платина, палладий, иридий, родий, осмий, рутений). К ним может быть отнесена и «полублагородная» медь. Обладают высокой устойчивостью против коррозии.

3. *Легкоплавкие металлы*: цинк, кадмий, ртуть, олово, свинец, висмут, таллий, сурьма и элементы с ослабленными металлическими свойствами – галлий, германий.

Применение металлов определяется их распространенностью в природе, а в историческом аспекте – развитием техники,

В табл. 1.2 описывается «металлическая часть» периодической системы, под символом элемента указывается дата открытия элемента (выделение металла в более или менее чистом виде из соединения в химической лаборатории) и дата промышленного применения (иногда две даты: начало применения в чистом виде и в виде ферросплава).

Таблица 1.2

Даты открытия и начала применения металлов

Li 1817	Be 1798 1920													
Na 1807	Mg 1755 1920	Al 1827 1895												
K 1807 1955	Ca 1808	Sc 1879	Ti 1789 1945 1930 Fe	V 1830 1950 1905 Fe	Cr 1797 1920 1900F e	Mn 1774 1930 1856 Fe	Fe III тыся- чилье- тие до н.э.	Co 1735 1910 1910 Fe	Ni 1751 1880 1880 Fe	Cu VI ты- сячилье- тие до н.э.	Zn Сред- ние века	Ga 1875	Ge 1886 1950	As Средние века
Rb 1861 1955	Sr 1790	Y 1794	Zr 1709 1950 1935 Fe	Nb 1801 1950 1940 Fe	Mo 1782 1910 1910 Fe	Tc 1937	Ru 1844 1900	Rh 1803 1890	Pd 1803 1880	Ag IV ты- сячилье- тие до н.э.	Cd 1817 1910	In 1863 1940	Sn IV ты- сячилье- тие до н.э.	Sb Средние века
Cs 1860	Ba 1808	La 1839	Hf 1922 1950	Ta 1802 1940 1920 Fe	W 1783 1910 1900 Fe	Re 1925 1960	Os 1803 1900	Ir 1803 1890	Pt 1735 1825	Au 1 млн. лет до н.э.	Hg Сред- ние века	Tl 1861	Pb V ты- сячилье- тие до н.э.	Bi Средние века

Применение металлов началось с меди, серебра и золота. Затем начали применять металлы, которые относительно легко восстанавливаются (олово, свинец), или их достаточно много в природе (железо).

Большинство металлов было открыто в XIX в., хотя тогда они не все получили промышленное применение.

Основную долю по изготовлению и применению имеет железо (в виде его сплава с углеродом – стали), что связано с рядом причин: малой стоимостью, наилучшими механическими свойствами, возможностью массового изготовления и большой распространенностью ее руд в природе.

Стали производят больше, чем всех остальных металлов вместе взятых.

Объем производства стали – важный показатель технической и экономической мощи страны. Без обеспечения в необходимом количестве сталью не может развиваться ни одна отрасль промышленности.

1.3. Кристаллическое строение металлов

Всякое вещество может находиться в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном.

Твердое вещество под воздействием сил тяжести сохраняет форму, а жидкое растекается и принимает форму сосуда. Однако это определение недостаточно для характеристики состояния вещества.

Так, например, твердое стекло при нагреве размягчается и постепенно переходит в жидкое состояние. Обратный переход будет также совершаться, плавно жидкое стекло по мере снижения температуры густеет и, наконец, загустеет до «твердого» состояния. У стекла нет определенной температуры перехода из жидкого в «твердое» состояние, нет и температуры (точки) резкого изменения свойств. Поэтому закономерно рассматривать «твердое» стекло как сильно загустевшую жидкость.

Следовательно, переход из твердого в жидкое и из жидкого в твердое состояние (так же, как и из газообразного в жидкое) происходит при определенной температуре и сопровождается резким изменением свойств.

Различие между газообразным, жидким и твердым состояниями заключается в следующем: в газах нет закономерности расположения частиц (атомов, молекул); частицы хаотически двигаются, отталкиваются одна от другой, и газ стремится занять возможно больший объем.

В твердых телах порядок расположения атомов определенный, закономерный, силы взаимного притяжения и отталкивания уравновешены, и твердое тело сохраняет свою форму (рис. 1.1).

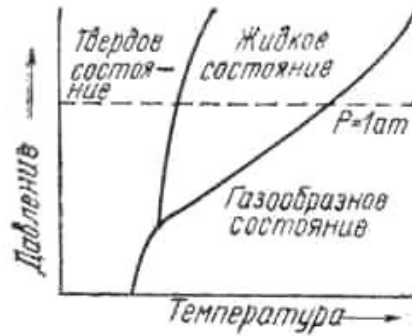


Рис. 1.1. Области твердого, жидкого и газообразного состояния в зависимости от температуры и давления

В жидкости частицы (атомы, молекулы) сохраняют лишь так называемый *ближний порядок*, т.е. в пространстве закономерно расположено небольшое количество атомов, а не атомы всего объема, как в твердом теле. Ближний порядок неустойчив: он то возникает, то исчезает под действием тепловых колебаний.

Таким образом, жидкое состояние – как бы промежуточное между твердым и газообразным; при соответствующих условиях возможен непосредственный переход из твердого состояния в газообразное без расплавления – *сублимации* (рис. 1.1),

Правильное, закономерное расположение частиц (атомов, молекул) в пространстве характеризует *кристаллическое состояние*. Поэтому в физике кристаллическое состояние и твердое состояние – синонимы.

Гипотеза о том, что в кристаллах расположение частиц (атомов) закономерное, была выдвинута очень давно (Е.С. Федоров, 1860 г.), но только после открытия рентгеновских лучей (Рентген, 1895 г.) и применения их к изучению строения кристаллов (М. Лауэ, 1912 г.) это было установлено экспериментально. Многочисленные работы, проведенные с того времени физиками многих стран, выявили расположение атомов в кристаллах различных веществ, в том числе у металлов и сплавов.

Кристаллическое строение можно представить себе в виде пространственной решетки, в узлах которой расположены атомы (рис. 1.2).

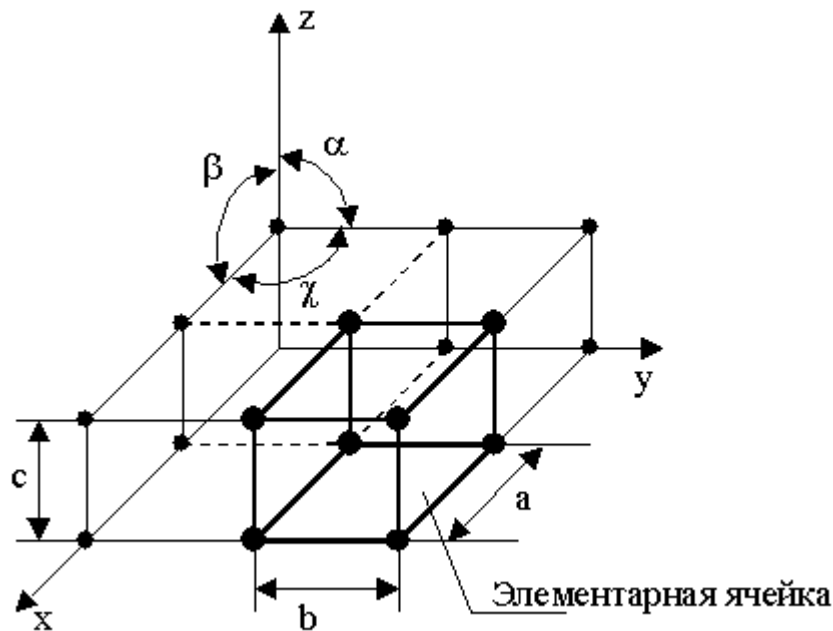


Рис. 1.2. Схема кристаллической решетки

Элементарная ячейка – элемент объема из минимального числа атомов, многократным переносом которого в пространстве можно построить весь кристалл.

Элементарная ячейка характеризует особенности строения кристалла. Основными параметрами кристалла являются:

- размеры ребер элементарной ячейки. a , b , c – периоды решетки – расстояния между центрами ближайших атомов. В одном направлении выдерживаются строго определенными;
- углы между осями (α , β , γ);
- координационное число (K) указывает на число атомов, расположенных на ближайшем, одинаковом расстоянии от любого атома в решетке;
- базис решетки, количество атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку решетки;
- плотность упаковки атомов в кристаллической решетке – объем, занятый атомами, которые условно рассматриваются как жесткие шары. Ее определяют как отношение объема, занятого атомами к объему ячейки (для объемно-центрированной кубической решетки – 0,68, для гранецентрированной кубической решетки – 0,74).

1.4. Кристаллические решетки металлов

Как указывалось, *кристаллическое состояние прежде всего характеризуется определенным, закономерным расположением атомов в пространстве.*

Это обуславливает то, что в кристалле каждый атом имеет одно и то же количество ближайших атомов – соседей, расположенных на одинаковом от него расстоянии.

Стремление атомов (ионов) металла расположиться возможно ближе друг к другу, плотнее, приводит к тому, что число встречающихся комбинаций взаимного расположения атомов металла в кристаллах невелико.

Существует ряд схем и способов описания вариантов взаимного расположения атомов в кристалле. Взаимное расположение атомов в одной из плоскостей показано на схеме размещения атомов (рис. 1.2). Воображаемые линии, проведенные через центры атомов, образуют решетку, в узлах которой располагаются атомы (положительно заряженные ионы); это так называемая *кристаллографическая плоскость*. Многократное повторение кристаллографических плоскостей, расположенных параллельно, воспроизводит *пространственную кристаллическую решетку*, узлы которой являются местом расположения атомов (ионов). Расстояния между центрами соседних атомов измеряются *ангстремами* ($1 \text{ \AA} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ см}$).

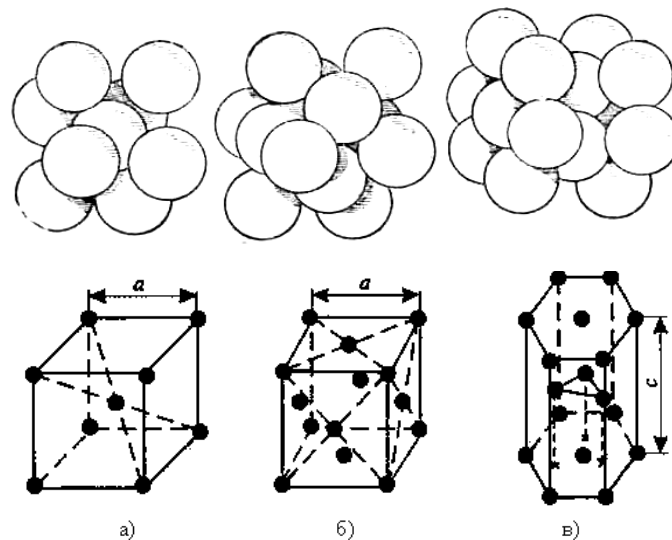


Рис. 1.3. Элементарные кристаллические ячейки: а – кубическая объемно-центрированная; б – кубическая гранецентрированная; в – гексагональная плотноупакованная

Взаимное расположение атомов в пространстве и величину между атомных расстояний определяют рентгеноструктурным анализом.

Расположение атомов в кристалле весьма удобно изображать в виде пространственных схем, в виде так называемых *элементарных кристаллических ячеек*. Под элементарной кристаллической ячейкой подразумевается наименьший комплекс атомов, который при многократном повторении в пространстве позволяет воспроизвести пространственную кристаллическую решетку.

Простейшим типом кристаллической ячейки является *кубическая решетка*. В простой кубической решетке атомы расположены (упакованы) недостаточно плотно.

Стремление атомов металла занять места, наиболее близкие друг к другу, приводит к образованию решеток других типов: *кубической объемно-центрированной* (рис. 1.3. а), *кубической гранецентрированной* (рис. 1.3. б) и *гексагональной плотноупакованной* (рис. 1.3. в).

Кружки, изображающие атомы, располагаются в центре куба по его вершинам (куб объемно-центрированный), или в центрах граней и по вершинам куба (куб гранецентрированный), или в виде шестигранника, внутрь которого наполовину вставлен также шестигранник, три атома верхней плоскости которого находятся внутри шестигранной призмы (гексагональная решетка).

Метод изображения кристаллической решетки, приведенный на рис. 1.3, является условным (как и любой другой). Может быть, более правильно изображение атомов в кристаллической решетке в виде соприкасающихся шаров (верхние схемы на рис. 1.3).

Размеры кристаллической решетки характеризуются *параметрами*, или *периодами решетки*. Кубическую решетку определяет один параметр – длина ребра куба a (рис. 1.3. а, б). Параметры имеют величины порядка атомных размеров и измеряются в ангстремах.

Так, например, параметр решетки хрома, имеющего структуру объемно-центрированного куба, равен $2,878 \text{ \AA}$, а параметр решетки алюминия, имеющего структуру гранецентрированного куба, – $4,041 \text{ \AA}$.

Параметр решетки – чрезвычайно важная характеристика. Современные методы рентгеновского исследования позволяют измерить параметр с точностью до четвертого или даже пятого знака после запятой, т.е. одной десятитысячной – одной стотысячной доли ангстрема.

Для металлов распространена гексагональная решетка (рис. 1.3. в).

Если слои атомов касаются друг друга, т.е. три атома, изображенные внутри решетки (рис. 1.3. в), касаются атомов, расположенных на верхней и нижней плоскостях, то имеем так называемую *гексагональную плотноупакованную решетку*.

Размеры гексагональной плотноупакованной решетки характеризуются постоянным значением $c/a = 1,633$. При иных значениях c/a получается неплотнупакованная гексагональная решетка.

Кубическая гранецентрированная и гексагональная решетки представляют самый плотный способ укладки шаров одного диаметра.

Некоторые металлы имеют *тетрагональную решетку* (рис. 1.4); она характеризуется тем, что ребро c не равно ребру a . Отношение этих параметров характеризует так называемую степень тетрагональности. При $c/a=1$ получается кубическая решетка. В зависимости от пространственного расположения атомов тетрагональная решетка (как и кубическая) может быть простой, объемно-центрированной и гранецентрированной.

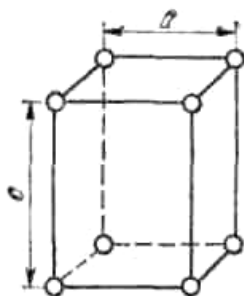


Рис. 1.4. Тетрагональная решетка

Существенное значение для свойств данного металла или сплава имеет число атомов, находящихся во взаимном контакте. Это определяется числом атомов, равноотстоящих на ближайшем расстоянии от любого атома.

Число атомов, находящихся на наиболее близком и равном расстоянии от данного атома, называется *координационным числом*. Так, например, атом в простой кубической решетке имеет шесть ближайших равноотстоящих соседей, т.е. координационное число этой решетки равно 6.

Центральный атом в объемно-центрированной решетке имеет восемь ближайших равноотстоящих соседей, т.е. координационное число этой решетки равно 8. Координационное число для гранецентрированной решетки равно 12. В случае гексагональной плотноупакованной решетки координационное число равно 12, а в случае $c/a \neq 1,633$ каждый атом имеет шесть атомов на одном расстоянии и шесть на другом (координационное число 6). Для краткого обозначения кристаллической решетки с указанием в этом обозначении типа кристаллической решетки

ки и координационного числа была принята одна из следующих систем:

Решетка	Обозначение	Координационное число
Простая кубическая	к	К6
Кубическая объемно-центрированная	о.ц.к.	К8
Кубическая гране-центрированная	г.ц.к.	К12
Гексагональная плотноупакованная ($c/a= 1,633$)	г.п.у.	Г12
Гексагональная	г	Г6

Каждый металл обладает определенной кристаллической решеткой, которая у некоторых металлов при изменении внешних условий может изменяться. Это явление называется *поллиморфизмом*.

В табл. 1.3 указаны решетки металлических элементов.

Таблица 1.3

Кристаллические решетки металлических элементов

3 Li K8	4 Be Г12												
11 Na K8	12 Mg Г12	13 Al K12											
19 K K8	20 Ca K12 (Г12)	21 Sc	22 Ti Г12 K8	23 V K8	24 Cr K8	25 Mn	26 Fe K8 K12	27 Co Г12 K12	28 Ni K12	29 Cu K12	30 Zn Г6	31 Ga тетраго- нальная	32 Ge алмаза
37 Rd K8	38 Sr K12	39 Y Г12	40 Zr Г12 K8	41 Nb K8	42 Mo K8	43 Tc	44 Ru Г12	45 Rh K12	46 Pd K12	47 Ag K12	48 Cd Г12	49 In тетраго- нальная	50 Sn алмаза, тетраго- нальная
55 Cs K8	56 Ba K8	57-71 редкозе- мельные элементы K12 Г12	72 Hf Г12	73 Ta K8	74 W K8	75 Re Г12	76 Os Г12	77 Ir Г12	78 Pt K12	79 Au K12	80 Hg Г6	81 Tl Г12 K12	8 Pb K12

Типично металлические элементы, расположенные в левой части таблицы Д.И. Менделеева, кристаллизуются в плотной упаковке, т.е. в простые кристаллические ячейки с большим координационным числом. Типично металлическими решетками являются, как указывалось, решетки о.ц.к., г.ц.к. и г.п.у. Действительно, почти все металлы, начиная от цинка, кадмия и ртути, и левее, как видно из табл. 1.3, имеют в большинстве случаев простые решетки.

Для неметаллических элементов, расположенных в правой части таблицы, характерно малое значение координационного числа (К4 и меньше). Неметаллы обладают меньшей плотностью и меньшим удельным весом, чем металлы.

Атомный радиус элемента, определяемый как расстояние между центрами наиболее близко расположенных атомов, является периодическим свойством вещества, что иллюстрируется табл. 1.4.

Таблица 1.4

*Атомные радиусы металлических элементов в ангстремах,
(по Г.Б. Бокию, для координационного числа 12)*

3 Li 1,57	4 Be 1,13											
11 Na 1,92	12 Mg 1,60	13 Al 1,43										
19 K 2,36	20 Ca 1,97	21 Sc 1,65	22 Ti 1,45	23 V 1,36	24 Cr 1,28	25 Mn 1,31	26 Fe 1,27	27 Co 1,26	28 Ni 1,24	29 Cu 1,28	30 Zn 1,37	31 Ga 1,39
37 Rd 2,53	38 Sr 2,16	39 Y 1,81	40 Zr 1,60	41 Nb 1,47	42 Mo 1,40	43 Tc 1,34	44 Ru 1,32	45 Rh 1,34	46 Pd 1,37	47 Ag 1,44	48 Cd 1,52	49 In 1,52
55 Cs 2,74	56 Ba 2,25	57-71 La 1,88	72 Hf 1,59	73 Ta 1,46	74 W 1,41	75 Re 1,37	76 Os 1,34	77 Ir 1,35	78 Pt 1,38	79 Au 1,44	80 Hg 1,55	81 Tl 1,71

1.5. Реальное строение металлических кристаллов

Кристаллы металлов обычно имеют небольшие размеры. Поэтому металлическое изделие состоит из очень большого числа кристаллов. Подобное строение называется поликристаллическим.

В поликристаллическом агрегате отдельные кристаллы не имеют возможности принять правильную форму. Кристаллы неправильной формы в поликристаллическом агрегате называются *зернами*, или *кристаллитами*.

Различие отдельных зерен состоит в различной пространственной ориентации кристаллической решетки (рис. 1.5). В общем случае ориентация кристаллической решетки в зерне случайна, с равной степенью вероятности может встретиться любая ориентация ее в пространстве.

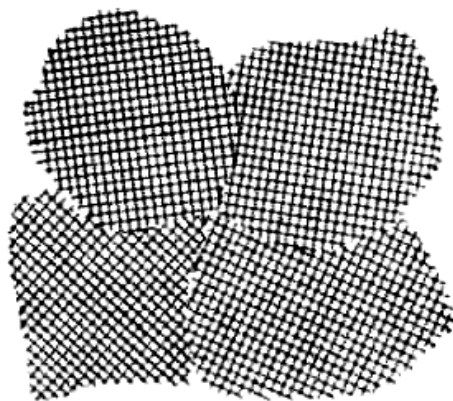


Рис. 1.5. Схема, иллюстрирующая различную ориентацию кристаллических решеток в поликристаллическом теле

Однако это состояние не является единственным. Пластическая деформация в холодном состоянии (прокатка, волочение и т.д.) приводит к преимущественной ориентировке зерен (*текстура*). Степень преимущественной ориентации может быть различна и изменяется от случайного распределения до такого состояния, когда все кристаллы ориентированы одинаково.

При очень медленном отводе тепла при кристаллизации, а также с помощью других специальных способов может быть получен кусок металла, представляющий собой один кристалл, так называемый *монокристалл*. Монокристаллы больших размеров (массой в несколько сотен граммов) изготавливают для научных исследований, а также для некоторых специальных отраслей техники (полупроводники).

Исследования показали, что внутренняя кристаллическая структура зерна не является правильной.

Характер и степень нарушения правильности или совершенства кристаллического строения определяют в значительной мере свойства металлов. Поэтому необходимо рассмотреть встречающиеся несовершенства кристаллического строения или, что –то же самое, строение реальных кристаллов.

Одним из видов несовершенства кристаллического строения является наличие незанятых мест в узлах кристаллической решетки, или иначе – *вакансий*, или атомных «дыроч» (рис. 1.6, а). Такой «точечный»

дефект решетки играет важную роль при протекании диффузионных процессов в металлах.

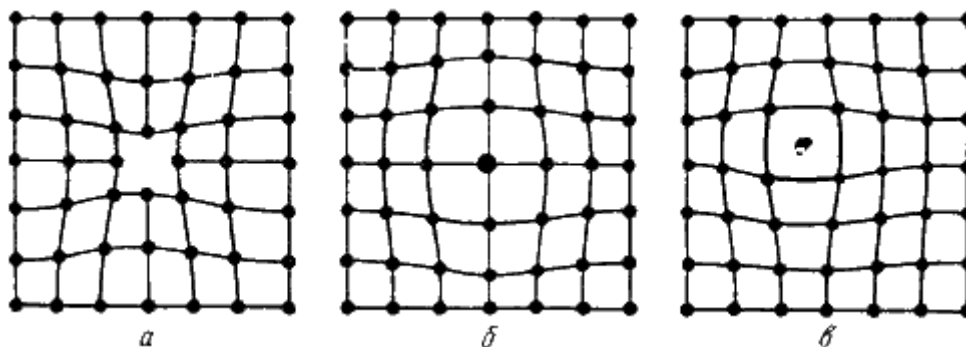


Рис. 1.6. Схема точечных дефектов: а – вакансия; б – замещенный атом; в – внедренный атом

Число вакансий при комнатной температуре очень мало по сравнению с общим числом атомов (примерно 1 вакансия на 10^{18} атомов), но сильно увеличивается с повышением температуры, особенно вблизи температуры плавления (1 вакансия на 10^4 атомов).

Другим важнейшим видом несовершенства кристаллического строения являются так называемые *дислокации*. Представим себе, что в кристаллической решетке по каким-либо причинам появилась лишняя полуплоскость атомов, так называемая *экстраплоскость* (рис. 1.7). Край 3–3 такой плоскости образует *линейный дефект* (несовершенство) решетки, который называется *краевой дислокацией*. Краевая дислокация может простираться в длину на многие тысячи параметров решетки, может быть прямой, но может и выгибаться в ту или другую сторону. В пределе она может закрутиться в спираль, образуя *винтовую дислокацию*. Вокруг дислокации возникает зона упругого искажения решетки. Расстояние от центра дефекта до места решетки без искажения принимают равным ширине дислокации, она невелика и равна нескольким атомным расстояниям.

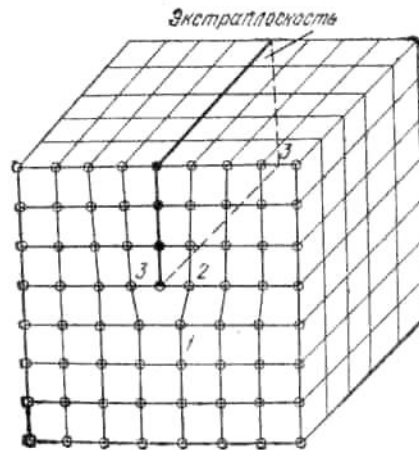


Рис. 1.7. Дислокация в кристаллической решетке

Вследствие искажения решетки в районе дислокаций (рис. 1.8. а) последняя легко смещается от нейтрального положения, а соседняя плоскость, перейдя в промежуточное положение (рис. 1.8. б), превратится в экстраплоскость (рис. 1.8. в), образуя дислокацию вдоль краевых атомов. Мы видим, таким образом, что дислокация может перемещаться (вернее, передаваться, как эстафета) вдоль некоторой плоскости (плоскости скольжения), расположенной перпендикулярно к экстраплоскости.

Согласно современным представлениям, в обычных чистых металлах плотность дислокаций, т.е. количество дислокаций в 1 см^3 , превышает один миллион. Механические свойства металлов зависят от количества дислокаций и, особенно, от способности их к перемещению и размножению.

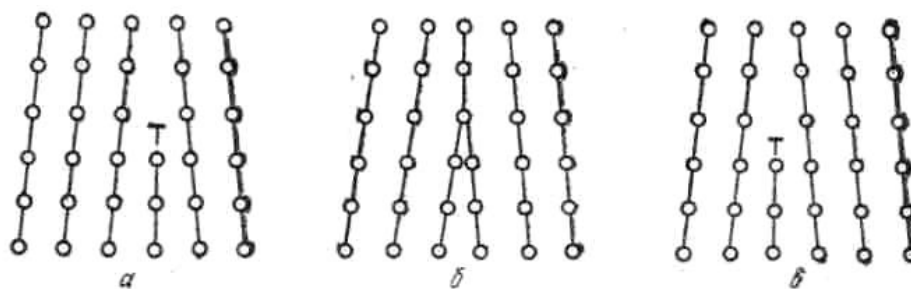


Рис. 1.8. Перемещение дислокации

Таким образом, правильность кристаллического строения нарушается двумя видами дефектов – точечными (вакансии) и линейными (дислокациями).

Вакансии непрерывно перемещаются в решетке, когда соседствующий с ней атом переходит в «дырку», оставляя пустым свое старое

место. Повышение температуры, тепловой подвижности атомов увеличивает число таких актов и увеличивает число вакансий.

Линейные дефекты не двигаются самопроизвольно и хаотически, как вакансии. Однако достаточно небольшого напряжения, чтобы дислокация начала двигаться, образуя плоскость, а в разрезе – линию скольжения C (рис. 1.9).

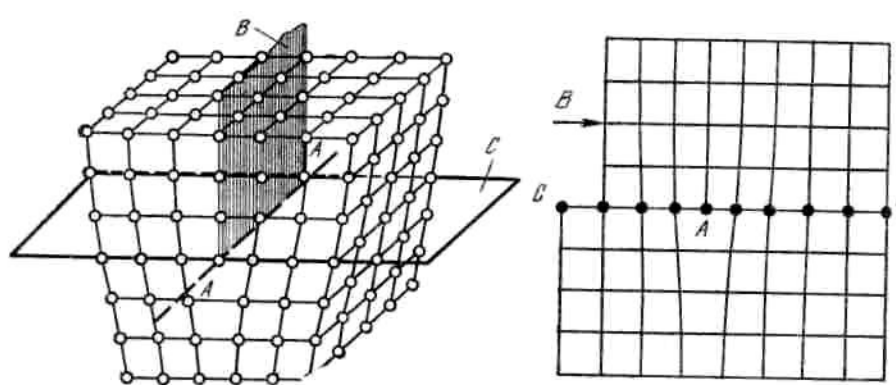


Рис. 1.9. Плоскость сдвига (C) как след движения дислокации ($A-A$); B – экстраплоскость

Как указывалось, вокруг дислокаций создается поле искаженной кристаллической решетки. Энергия искажения кристаллической решетки характеризуется так называемым *вектором Бюргерса*.

Если вокруг дислокации \perp (рис. 1.10) обвести контур $ABCD$, то участок BC будет состоять из шести отрезков, а участок AD из пяти. Разница $BC-AD = b$, где b означает величину вектора Бюргерса. Если контуром обвести несколько дислокаций (зоны искажений кристаллической решетки, которые перекрываются или сливаются), то величина его соответствует сумме векторов Бюргерса каждой дислокации. Способность к перемещению дислокаций связана с величиной вектора Бюргерса.

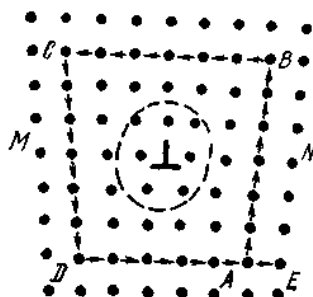


Рис. 1.10. Схема определения вектора Бюргерса для линейной дислокации

Кроме дислокационной структуры (она весьма разнообразна), важное значение имеет суммарная характеристика количества дислокаций, именуемая плотностью дислокаций. Под последней понимают суммарную длину дислокаций в сантиметрах, приходящихся на 1 см^3 , т.е. размерность плотности дислокации $\rho = \frac{\text{см}}{\text{см}^3} = \text{см}^{-2}$.

Для металлов плотность дислокаций колеблется обычно в пределах $10^8 - 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (т.е. миллион километров дислокаций в одном кубическом сантиметре).

Зерно не является монолитным кристаллом, построенным из строго параллельных атомных слоев. В действительности оно состоит как бы из мозаики отдельных блоков размерами $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ ($1000 - 100000 \text{ \AA}$), кристаллографические плоскости в которых повернуты друг относительно друга на небольшой угол – порядка нескольких минут. Такое строение зерна носит название *мозаичной структуры*, а составляющие ее блоки называются *блоками мозаики*. Изменение размеров блоков мозаичной структуры и их взаимной ориентации при различных процессах обработки металла приводит к изменению его свойств. Часто блоки объединяются в более крупные агрегаты – так называемые *фрагменты*. Каждый фрагмент содержит большое количество блоков. Фрагменты, в свою очередь, разориентированы относительно друг друга на угол в несколько градусов.

Таким образом, зерна металла разориентированы относительно друг друга на величину в несколько десятков градусов. Зерна могут состоять из фрагментов, разориентированных лишь на несколько градусов. Наконец, фрагменты могут состоять из блоков, разориентированных на очень небольшие углы, – в несколько минут. Такая трехступенчатая структура не обязательна. В ряде случаев зерна могут состоять из фрагментов без внутренней блочной структуры или только из блоков. Термический процесс, вызывающий деление зерна на фрагменты, называется *фрагментацией*, или *полигонизацией*.

Блоки мозаики, как правило, очень малы, но различимы под электронным микроскопом. Обычно размеры блоков и степень их разориентировки измеряют методами рентгеноструктурного анализа.

Если фрагменты крупные, то они хорошо видны при изучении под оптическим микроскопом.

На рис. 1.11 показана микроструктура металла, состоящего из крупных зерен, которые, в свою очередь, состоят из фрагментов и блоков.

Таким образом, реальный металлический кристалл содержит атомно-кристаллические (вакансии, дислокации) и структурные (блоки, фрагменты) несовершенства.

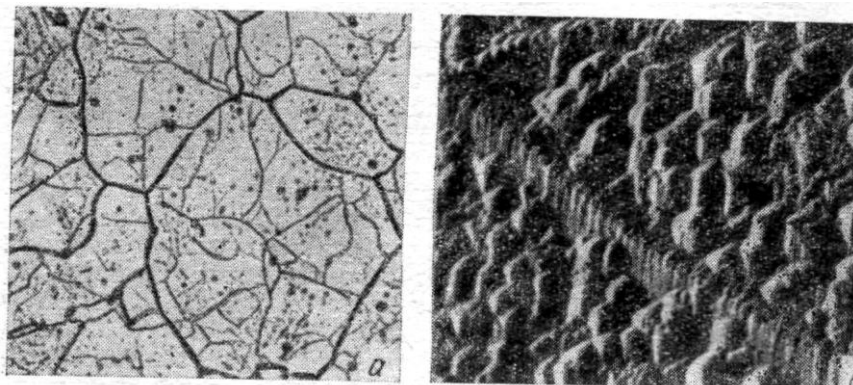


Рис. 1.11. Тонкая структура малоуглеродистой стали: а – зерна феррита (утолщенные границы) и фрагменты (тонкие границы); б – блочная структура зерна феррита (граница фрагментов и блоки)

Первые, т.е. вакансии и дислокации, распределены неравномерно, и они собираются на границах зерен, фрагментов и блоков.

Как указывалось выше, соседние зерна сильно разориентированы (угол разориентировки больше 5°) и между зернами имеется пограничный слой с сильно искаженной структурой и с высокой концентрацией атомно-кристаллических дефектов (рис. 1.12).

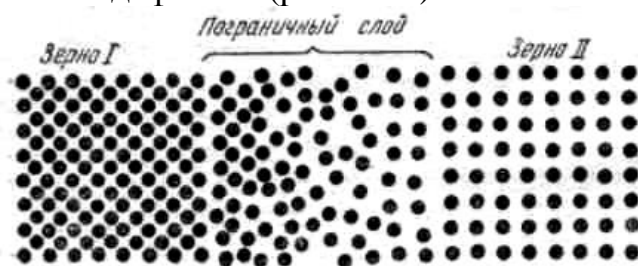


Рис. 1.12. Модель размещения атомов в объеме и на границе зерна

Разориентировка блоков не велика (менее 1°). Сочленение блоков друг с другом с сохранением правильной, хотя и искаженной, кристаллической структуры происходит посредством дислокаций.

Плотность дислокаций в этой части кристалла тем больше, чем больше угол разориентировки между блоками.

Свойства кристаллов данного металла связаны со многими факторами его внутреннего строения – содержанием (плотностью) вакансий и дислокаций, с их расположением (*дислокационной структурой*), с размерами и разориентировкой блочной структуры (*тонкой структурой*).

В настоящее время имеются многочисленные экспериментальные средства, с помощью которых изучают дислокационное и тонкое строение металлических кристаллов.

Следует еще отметить, что атомы на разветвленной, так называемой *внутренней поверхности* (т.е. на границах зерен, фрагментов, блоков) обладают повышенной энергией. Это обстоятельство приводит к тому, что многие происходящие процессы, о которых речь будет идти ниже, осуществляются лишь на границах зерен (фрагментов, блоков) или преимущественно и, как правило, на них.

1.6. Анизотропия свойств кристаллов

Рассматривая различные плоскости, например, в о.ц.к. решетке, можно легко заключить, что они заполнены атомами с различной плотностью.

Так, в заштрихованном квадрате (рис. 1.13. *a*) о.ц.к. решетки центры атомов располагаются по вершинам. Поскольку каждый из этих атомов принадлежит одновременно четырем квадратам, на долю каждого квадрата с площадью a^2 приходится полностью один атом.

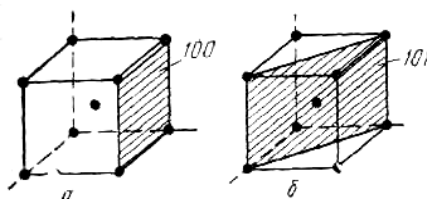


Рис. 1.13. Плоскости в решетке объемноцентрированного куба

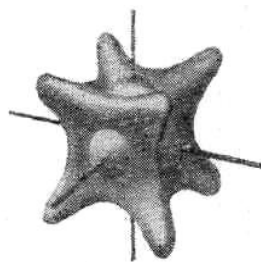


Рис. 1.14. Модель, показывающая изменение предела прочности кристалла меди в зависимости от направления приложения нагрузки

В заштрихованном прямоугольнике той же решетки на площадь $a^2\sqrt{2}$ (рис. 1.13) приходится два атома, а на долю каждого атома площадь $a^2\sqrt{2}/2$, что меньше площади a^2 , т. е. на этой плоскости атомов расположено больше.

Свойства отдельно взятого кристалла (монокристалла) по данному направлению отличаются от свойств кристалла другого направления (рис. 1.14) и, естественно, зависят от того, сколько атомов встречается в этом направлении. Различие свойств в зависимости от направления испытания носит название анизотропии. Все кристаллы анизотропны. Анизотропия – особенность любого кристалла, характерная для кристаллического строения.

Реальный металл состоит из многих кристаллов, размер каждого кристалла измеряется долями миллиметра, и поэтому в 1 см^3 металла содержатся десятки тысяч кристаллов. Произвольность ориентировки каждого кристалла приводит к тому, что в любом направлении располагается примерно одинаковое количество различно ориентированных кристаллов. В результате получается, что свойства такого поликристаллического тела одинаковы во всех направлениях, хотя свойства каждого кристалла, составляющего это тело, зависят от направления. Это явление называется квазиизотропией (ложная изотропия).

Глава 2. Кристаллизация

2.1. Три состояния вещества

Любое вещество, как известно, может находиться в трех агрегатных состояниях: газообразном, жидком и твердом. В чистых металлах при определенных температурах происходит изменение агрегатного состояния: твердое состояние сменяется жидким при температуре плавления, жидкое состояние переходит в газообразное при температуре кипения. Температуры перехода зависят от давления, но при постоянном давлении они вполне определены. Температуры перехода наиболее распространенных в технике металлов для давления 1 ат приведены в табл. 2.1.

Температура плавления – особенно важная константа свойств металла. Она колеблется для различных металлов в весьма широких пределах: от минус 38,9°С для ртути самого легкоплавкого металла, находящегося при комнатной температуре в жидком состоянии, до 34,10° С для самого тугоплавкого металла вольфрама.

Низкая прочность (твердость) при комнатной температуре легкоплавких металлов (олова, свинца и т.д.) является следствием главным образом того, что комнатная температура для этих металлов менее «удалена» от температуры плавления, чем у тугоплавких металлов.

Чтобы сравнить свойства различных металлов, испытания проводят при так называемых сходственных температурах, составляющих одинаковую долю от абсолютной температуры плавления (например, 0,5 от абсолютной температуры плавления будет для свинца 27°С, для железа 631°С, при этих температурах свойства свинца и железа довольно близки).

Таблица 2.1

Некоторые свойства важнейших металлов

Элемент	Номер элемента в периодической системе	Кристаллическая решетка	Атомный радиус, А ⁰	Плотность (при 20 ⁰ С), г/см ³	Температура		Коэффициент расширения (при 20 ⁰ С), α·10 ⁶	Твердость, НВ
					плавления, ⁰ С	кипения, ⁰ С		
Be	4	Г12	1,13	1,82	1284	2970	12,2	140
Mg	12	Г12	1,60	1,74	651	1110	25,7	30
Al	13	Г12	1,43	2,70	660	2500	23,1	20
Ti	22	Г12, К8	1,45	4,50	1660	3260	7,14	80
V	23	К8	1,36	5,96	1700	3000	8,3	260
Cr	24	К8	1,28	7,14	1850	2470	6,2	100
Mn	25	Сложная	1,31	7,46	1244	2150	22,1	200
Fe	26	К8, К12	1,27	7,86	1539	2880	11,5	70
Co	27	Г12, К12	1,26	8,9	1480	3150	12,5	50
Ni	28	К12	1,24	8,90	1455	3080	13,5	60
Cu	29	К12	1,28	8,92	1083	2300	16,5	35
Zn	30	Г6	1,37	7,14	419	907	32,5	35
Zr	40	Г12, К8	1,60	6,52	1860	3580	6,23	100
Nb	41	К8	1,47	8,5	2450	3700	7,2	80
Mo	42	К8	1,40	10,2	2625	4800	4,9	150
Ag	47	К12	1,44	10,5	960	1950	18,9	25
Sn	50	Алмаза К4	1,58	7,29	232	2430	46,6	5
W	74	К8	1,41	19,3	3410	5500	4,3	300
Au	79	К12	1,44	19,3	1063	2600	14,2	19
Hg	80	Г6	1,55	13,51	-38,9	357	-	-
Pb	82	К12	1,75	11,3	327	1750	28,1	4
U	92	Сложная	1,55	19,0	1133	3927	23	240

2.2. Энергетические условия процесса кристаллизации

При переходе из жидкого состояния в твердое состояние образуется кристаллическая решетка, возникают кристаллы. Такой процесс называется кристаллизацией.

Чем объясняется существование при одних температурах жидкого, а при других температурах твердого состояния и почему превращение происходит при строго определенных температурах?

В природе все самопроизвольно протекающие превращения, а следовательно, кристаллизация и плавление обусловлены тем, что новое состояние в новых условиях является энергетически более устойчивым, обладает меньшим запасом энергии.

Поясним примером.

Тяжелый шарик из положения 1 стремится попасть в более устойчивое положение 2 (рис. 2.1), так как потенциальная энергия в положении 2 меньше, чем в положении 1.

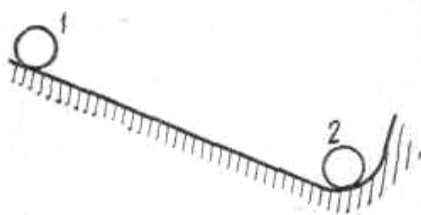


Рис. 2.1. Пояснительная схема

Энергетическое состояние системы, имеющей огромное число охваченных тепловым движением частиц (атомов, молекул), характеризуется особой термодинамической функцией F , называемой свободной энергией (свободная энергия $F = U - TS$, где U – внутренняя энергия системы; T – абсолютная температура; S – энтропия).

Можно сказать, что чем больше свободная энергия системы, тем система менее устойчива, и если имеется возможность, то система переходит в состояние, где свободная энергия меньше («подобно» шарик, который скатывается из положения 1 в положение 2, если на пути нет препятствия).

С изменением внешних условий, например, температуры, свободная энергия системы изменяется по сложному закону, но различно для жидкого и кристаллического состояний. Схематически характер изменения свободной энергии жидкого и твердого состояний с температурой показан на рис. 2.2.

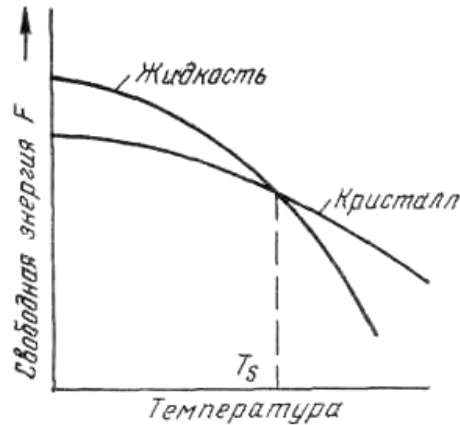


Рис. 2.2. Изменение свободной энергии жидкого и кристаллического состояния в зависимости от температуры

Выше температуры T_s меньшей свободной энергией обладает вещество в жидком состоянии, ниже T_s — вещество в твердом состоянии. Следовательно, выше T_s вещество должно находиться в жидком состоянии, а ниже T_s — в твердом, кристаллическом.

Очевидно, что при температуре, равной T_s , свободные энергии жидкого и твердого состояний равны, металл в обоих состояниях находится в равновесии. Эта температура T_s и есть равновесная или теоретическая температура кристаллизации.

Однако при T_s не может происходить процесс кристаллизации (плавление), так как при данной температуре

$$F_{\text{ж}} = F_{\text{кр.}}$$

Для начала кристаллизации необходимо, чтобы процесс был термодинамически выгоден системе и сопровождался уменьшением свободной энергии системы. Из кривых, приведенных на рис. 2.2, видно, что это возможно только тогда, когда жидкость будет охлаждена ниже точки T_s . Температура, при которой практически начинается кристаллизация, может быть названа фактической температурой кристаллизации.

Охлаждение жидкости ниже равновесной температуры кристаллизации называется переохлаждением.

Указанные причины обуславливают и то, что обратное превращение из кристаллического состояния в жидкое может произойти только выше температуры T_s ; это явление называется перенагреванием.

Величиной или степенью переохлаждения называют разность между теоретической и фактической температурами кристаллизации.

Если, например, теоретическая температура кристаллизации сурьмы равна 631°C , а до начала процесса кристаллизации жидкая сурьма была переохлаждена до 590°C и при этой температуре закристаллизовалась, то степень переохлаждения n определяется разностью $631 - 590 = 41^{\circ}\text{C}$.

Процесс перехода металла из жидкого состояния в кристаллическое можно изобразить кривыми в координатах время – температура (рис. 2.3).

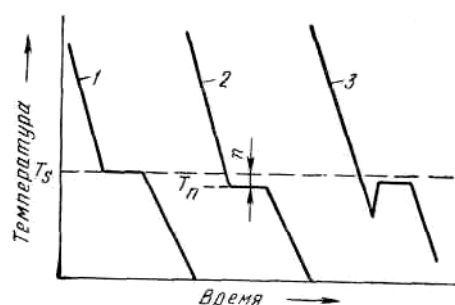


Рис. 2.3. Кривые охлаждения при кристаллизации состоянии

Охлаждение металла в жидком состоянии сопровождается плавным понижением температуры и может быть названо простым охлаждением, так как при этом нет качественного изменения состояния.

При достижении температуры кристаллизации на кривой температура–время появляется горизонтальная площадка, так как отвод тепла компенсируется выделяющейся при кристаллизации скрытой теплотой кристаллизации. По окончании кристаллизации, т. е. после полного перехода в твердое состояние, температура снова начинает снижаться и твердое кристаллическое вещество охлаждается. Теоретически процесс кристаллизации изображается кривой 1. Кривая 2 показывает реальный процесс кристаллизации. Жидкость непрерывно охлаждается до температуры переохлаждения T_n , лежащей ниже теоретической температуры кристаллизации T_s . При охлаждении ниже температуры T_s создаются энергетические условия, необходимые для протекания процесса кристаллизации.

У некоторых металлов из-за большого переохлаждения скрытая теплота плавления выделяется в первый момент кристаллизации настолько бурно, что температура скачкообразно повышается, приближается к теоретической (кривая 3 на рис. 2.3). Так кристаллизуется, например, сурьма. Для большинства же металлов величина переохлаждения при кристаллизации оказывается весьма незначительной и даже не улавливается в нормальных условиях эксперимента.

2.3. Механизм процесса кристаллизации

Еще в 1878г. Д.К. Чернов, изучая структуру литой стали, указал, что процесс кристаллизации состоит из двух элементарных процессов. Первый процесс заключается в зарождении мельчайших частиц кристаллов, которые Чернов называл «зачатками», а теперь их называют зародышами, или центрами кристаллизации. Второй процесс состоит в росте кристаллов из этих центров.

Систематическое исследование процесса образования центров кристаллизации и их роста вначале на прозрачных органических веществах, а затем и металлах было проведено Г. Тамманом. Им установлена в общем виде зависимость между числом центров кристаллизации, скоростью роста и степенью переохлаждения. Однако более поздние исследования процессов кристаллизации, особенно исследования А.А. Бочвара, К.П. Бунина и др., показали ограниченное значение схемы Таммана для процесса кристаллизации реальных жидких металлов. Все же многие закономерности, установленные Тамманом на основе его опытов, нашли качественное подтверждение в последующих работах и оказываются полезными при анализе процессов кристаллизации.

Процесс образования кристаллов путем зарождения центров кристаллизации и их роста можно изучать с помощью рассмотрения моделей (схем), что с успехом применялось И.Л. Миркиным. Подобная модель кристаллизации представлена на рис. 2.4.

Предположим, что на площади, изображенной на рис. 2.4, за секунду возникает пять зародышей, которые растут с определенной скоростью. К концу первой секунды образовалось пять зародышей, к концу второй секунды они выросли, и одновременно с этим возникло еще пять новых зародышей будущих кристаллов. Так, в результате возникновения зародышей и их роста происходит процесс кристаллизации, который, как видно в данном примере, заканчивается на седьмой секунде.

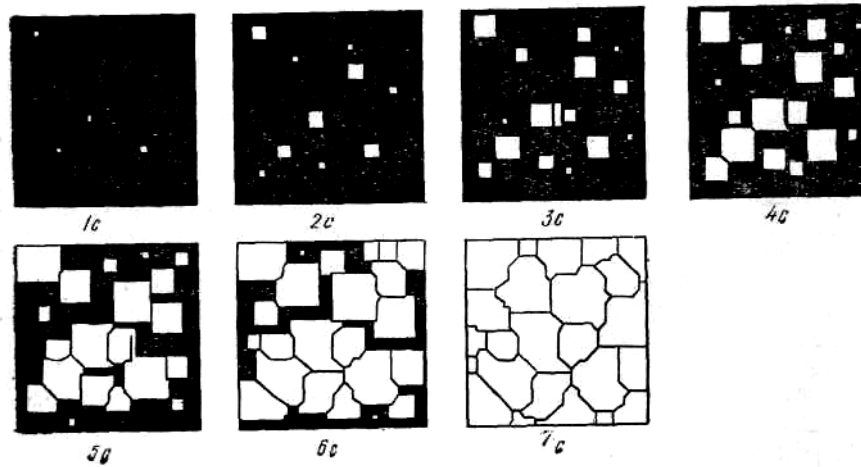


Рис. 2.4. Модель процесса кристаллизации (И.Л. Миркин)

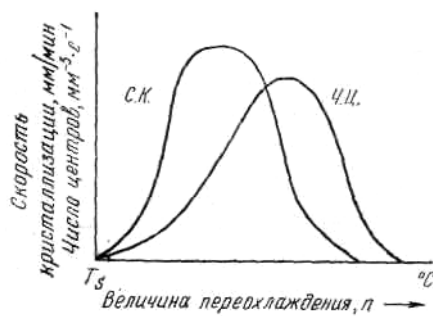


Рис. 2.5. Кинетическая кривая кристаллизации

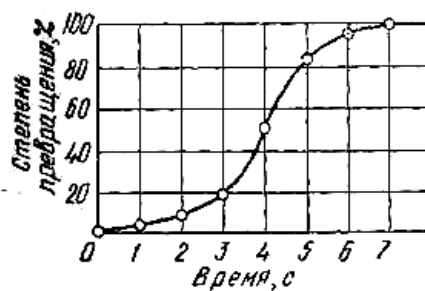


Рис. 2.6. Скорость роста кристаллов (с. к.) и скорость зарождения центров кристаллизации (ч. ц.) в зависимости от степени переохлаждения

Качественная схема процесса кристаллизации, изображенная на рис. 2.4, может быть представлена количественно кинетической кривой (рис. 2.5).

Рассмотрение подобных схем кристаллизации позволяет объяснить два важных момента:

1. По мере развития процесса кристаллизации в нем участвует все большее и большее число кристаллов. Поэтому процесс вначале ускоряется, пока в какой-то момент взаимное столкновение растущих кристаллов не начинает заметно препятствовать их росту; рост кристаллов замедляется, тем более что и жидкости, в которой образуются новые кристаллы, становится все меньше.

2. В процессе кристаллизации, пока кристалл окружен жидкостью, он часто имеет правильную форму, но при столкновении и срастании кристаллов их правильная форма нарушается, внешняя форма кристалла оказывается зависимой от условий соприкосновения растущих кристаллов. Вот почему кристаллы металла, зерна (кристаллиты) не имеют правильной формы, о чем указывалось в гл. 1.

Скорость всего процесса кристаллизации количественно определяется двумя величинами: скоростью зарождения центров кристаллизации и скоростью роста кристаллов. Обе эти величины можно измерить для разных условий кристаллизации.

Число зарождающихся в единицу времени кристаллов, которые в дальнейшем мы будем обозначать буквами ч.ц., имеет размерность $1/\text{мм}^3 \cdot \text{с}$ (число центров кристаллизации, возникших в 1 мм^3 за одну секунду). Скорость роста кристаллов, обозначаемая в дальнейшем через с.к., то есть скорость увеличения линейных размеров кристалла, выражена в миллиметрах в единицу времени. Размерность этой величины – $\text{мм}/\text{с}$; $\text{мм}/\text{мин}$.

Исследуя кристаллизацию прозрачных органических веществ при разных температурах, Г. Тамман установил, что ч.ц. и с.к. определяются степенью переохлаждения. Графически изменения величин ч.ц. и с.к. в зависимости от переохлаждения представлены на рис. 2.6. Зависимость ч.ц. и с.к. от переохлаждения выражается кривой с максимумом. При теоретической температуре кристаллизации ($n=0$) значения с.к. и ч.ц. равны нулю, и процесс кристаллизации идти не может, что находится в полном соответствии с изложенным выше положением о необходимости переохлаждения для протекания процесса. С увеличением переохлаждения значения с.к. и ч.ц. возрастают, достигают максимума и затем понижаются, при больших величинах переохлаждения практически падают до нуля.

Увеличение с.к. и ч.ц. при малых степенях переохлаждения обусловлено тем, что вблизи равновесной точки (T_s) подвижность жидкости велика и ускорение кристаллизации с увеличением степени переохлаждения вызывается увеличением разности свободных энергий жидко-

го и кристаллического состояний. Снижение с.к. и ч.ц. при больших степенях переохлаждения вызвано тем, что при больших переохлаждениях и, следовательно, при низких температурах подвижность атомов уменьшена, а тем самым уменьшена и способность системы к превращению. При больших степенях переохлаждения с.к. и ч.ц. становятся равными нулю, так как подвижность атомов уже недостаточна для того, чтобы осуществилась перестройка их из хаотического расположения в жидкости в правильное в кристалле.

Размер образовавшихся кристаллов зависит от соотношения величин с.к. и ч.ц. при температуре кристаллизации, приданной степени переохлаждения. При большом значении с.к. и малом значении ч.ц., например, при малых степенях переохлаждения (рис. 2.6) образуются немногочисленные крупные кристаллы. При малых значениях с.к. и больших ч.ц. (большое переохлаждение) образуется большое число мелких кристаллов. Наконец, в соответствии с кривыми Таммана, если удастся очень сильно переохладить жидкость без кристаллизации, то с.к. и ч.ц. становятся равными нулю, жидкость сохраняется непревращенной, незакристаллизовавшейся. Однако жидкие металлы мало склонны к переохлаждению и такого состояния достичь не могут. Соли, силикаты, органические вещества, наоборот, весьма склонны к переохлаждению. Обычное прозрачное «твердое» стекло представляет собой переохлажденную загустевшую жидкость. Такое состояние, как указывалось выше, является аморфным и характеризуется отсутствием определенной температуры плавления и правильного расположения атомов в виде определенной кристаллической решетки.

Было показано, что не только в жидких расплавах, но и при превращении в твердом состоянии новая фаза образуется путем зарождения и роста кристаллов; скорость этих процессов зависит от переохлаждения. В отличие от кристаллизации из жидкости процесс превращения в твердом состоянии (перекристаллизация) обычно протекает при сильном переохлаждении, и таммановская зависимость с.к. и ч.ц. для этого случая даже более приемлема, чем для случая первичной кристаллизации.

Учитывая изложенное, можно отметить, что переход из одного состояния в другое, например, из жидкого в твердое, возможен тогда, когда твердое состояние более устойчиво, имеет более низкое значение свободной энергии. Но сам переход из одного состояния в другое требует затраты энергии на образование поверхности раздела жидкость – кристалл.

Превращение произойдет тогда, когда выигрыш в энергии от перехода в более устойчивое состояние будет больше потери энергии, идущей на образование поверхности раздела.

Другими словами, свободная энергия системы $\Delta\Phi$ определяется как алгебраическая сумма двух членов, характеризующих поверхностную $S\sigma$ и объемную $V\Delta F$ энергии:

$$\Delta\Phi = S\sigma - V\Delta F,$$

где S – поверхность; σ – поверхностное натяжение; V – объем; ΔF – разность свободных энергий жидкого и кристаллического состояний, приходящаяся на единицу объема.

По мере увеличения зародыша (для зародыша сферической формы) поверхностный член увеличивается пропорционально квадрату радиуса, а объемный – кубу, т.е. если поверхность и объем частицы выразить через ее радиус, то получим

$$\Delta\Phi = 4\pi r^2 n\sigma - \frac{4}{3}\pi r^3 n\Delta F,$$

где r – радиус частицы новой фазы; n – число частиц.

Увеличение размера зарождающегося кристалла вначале приводит к росту свободной энергии, так как объем V мал, а поверхность S относительно велика (рис. 2.7). Но при некотором критическом значении увеличение размера зародыша приведет к уменьшению $\Delta\Phi$.

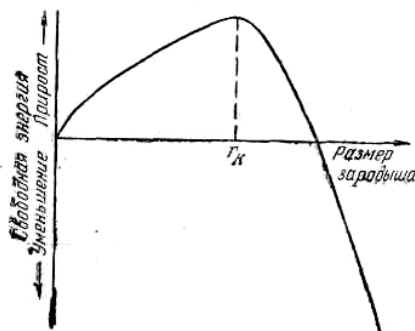


Рис. 2.7. Изменение свободной энергии в зависимости от размера зародыша

Процесс кристаллизации может протекать только при условии уменьшения свободной энергии, поэтому, если образуется зародыш размером меньше r_k (рис. 2.7), он расти не может, так как это повело бы к увеличению энергии системы. Если же образуется зародыш разме-

ром r_k и более, то его рост возможен, так как это приведет к уменьшению свободной энергии.

Минимальный размер способного к росту зародыша называется критическим размером зародыша, а такой зародыш называется устойчивым.

Каждой температуре кристаллизации (степени переохлаждения) отвечает определенный размер устойчивого зародыша; более мелкие, если они и возникнут, тут же растворяются в жидкости, а более крупные растут, превращаясь в зерна – кристаллы. Чем ниже температура (больше степень переохлаждения), тем меньший размер имеет устойчивый зародыш, тем больше число центров кристаллизации образуется в единицу времени, тем быстрее протекает процесс кристаллизации. Таким образом, с увеличением степени переохлаждения быстро возрастают величина ч.ц. и общая скорость кристаллизации.

2.4. Форма кристаллических образований

Реально протекающий процесс кристаллизации усложняется действием различных факторов, в столь сильной степени влияющих на процесс, что роль степени переохлаждения может стать в количественном отношении второстепенной.

При кристаллизации из жидкого состояния для скорости течения процесса и для формы образующихся кристаллов первостепенное значение приобретают такие факторы, как скорость и направление отвода тепла, наличие нерастворившихся частиц, наличие конвекционных токов жидкости и т.д.

В направлении отвода тепла кристалл растет быстрее, чем в другом направлении.

Если на боковой поверхности растущего кристалла возникает бугорок, то кристалл приобретает способность расти и в боковом направлении. В результате образуется древовидный кристалл, так называемый дендрит, схематическая структура которого, впервые изображенная Д.К. Черновым, показана на рис. 2.8.

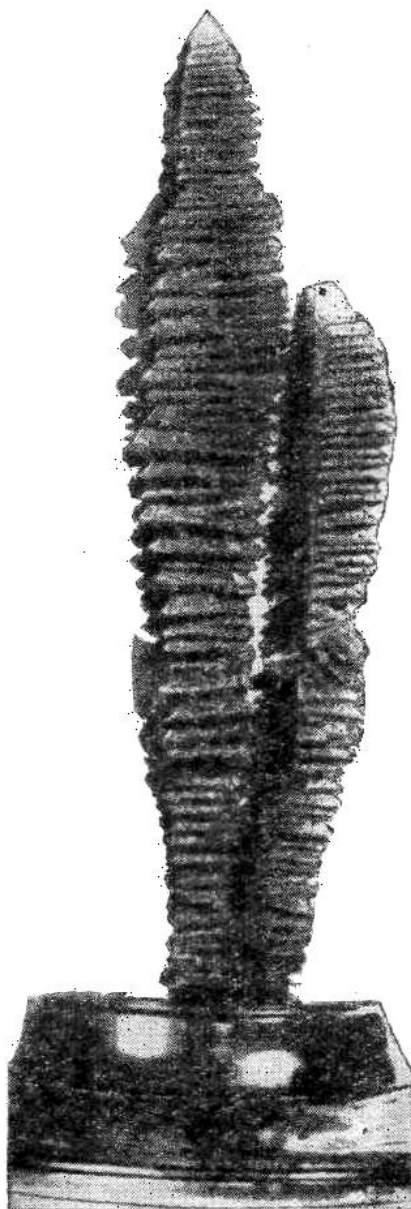


Рис. 2.8. Кристалл Чернова

Дендритное строение, вообще говоря, является типичным для литого металла. Если условия кристаллизации благоприятны, то иногда вырастают огромные дендриты. В усадочной раковине 100-т стального слитка один из учеников Д. К. Чернова нашел дендрит длиной в 39 см. Дендрит большего размера найти не удалось. Фотография этого дендрита, который обычно называется «кристаллом Чернова», приведена на рис. 2.8.

Дендриты нормального размера, встречающиеся в литых металлах, имеют размеры намного меньше и длину несколько миллиметров.

Следует иметь в виду, что дендриты, в свою очередь, состоят из многих тысяч или миллионов зерен, подобных тем, которые изображены на рис. 2.9. В объеме одного дендрита эти зерна имеют, по видимому, близкую ориентировку.

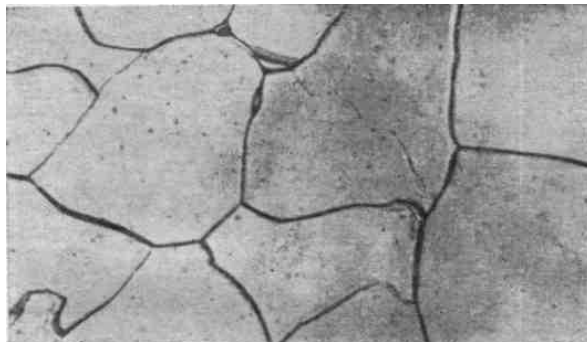


Рис. 2.9. Микроструктура металла

Приведенная на рис. 2.9. структура носит название полиэдритной, т.е. состоящей из более или менее равноосных зерен, имеющих приблизительно одинаковые размеры во всех направлениях.

2.5. Превращения в твердом состоянии. Аллотропия

Атомы данного элемента могут образовать, если исходить только из геометрических соображений, любую кристаллическую решетку. Однако устойчивым, а следовательно, реально существующим типом, является решетка, обладающая наиболее низким запасом свободной энергии. Так, например, в твердом состоянии литий, натрий, калий, рубидий, цезий, молибден, вольфрам и другие металлы имеют объемно-центрированную кубическую решетку. Алюминий, кальций, медь, серебро, золото, платина и др. – гранецентрированную, а бериллий, магний, цирконий, гафний, осмий и некоторые другие – гексагональную.

Однако в ряде случаев при изменении температуры или давления может оказаться, что для того же металла более устойчивой будет другая решетка, чем та, которая была при иной температуре или давлении. Так, например, существует железо с решетками объемно-центрированного и гранецентрированного кубов, обнаружен кобальт с гранецентрированной и с гексагональной решетками. В различных решетках кристаллизуются также олово, марганец, титан и некоторые другие металлы.

Существование одного металла (вещества) в нескольких кристаллических формах носит название полиморфизма, или аллотропии. Различные кристаллические формы одного вещества называются полиморфными, или аллотропическими модификациями.

Небольшие изменения давления, которые могут возникать в практике, обычно не приведут к полиморфным превращениям. Поэтому для практического металловедения важна главным образом температурная аллотропия.

В табл. 2.2 показан интервал температур существования различных аллотропических форм некоторых, имеющих практическое значение металлов, у которых обнаружена температурная аллотропия.

Таблица 2.2

Аллотропические формы металлов

Металл (элемент)	Аллотропическая форма	Интервал температур устойчивого состояния, °С	Кристаллическая решетка
Fe	α	<911	Кубическая объемноцентрированная (К8)
	γ	1392–1539 911–1392	Кубическая гранецентрированная (К12)
Co	α	<450	Гексагональная (Г12)
	β	450–1480	Кубическая гранецентрированная (К12)
Sn	α	<18	Решетка алмаза
	β	18–232	Тетрагональная объемноцентрированная
Mn	α	<700	Кубическая сложная многоатомная
	β	700–1079	То же
	γ	1079–1143	Тетрагональная гранецентрированная
	δ	1143–1244	Кубическая объемноцентрированная (К8)
Ti	α	<882	Гексагональная (Г12)
	β	882–1660	Кубическая объемноцентрированная (К8)
Zr	α	<867	Гексагональная (Г12)
	β	867–1860	Кубическая объемноцентрированная (К8)
U	α	<668	Орторомбическая
	β	668–720	Тетрагональная
	γ	720–1132	Кубическая объемноцентрированная (К8)

Аллотропические формы обозначаются греческими буквами α , β , γ и т.д., которые в виде индексов добавляют к символу, обозначающему элемент. Аллотропическая форма, существующая при самой низкой температуре, обозначается α , следующая – β .

Превращение одной аллотропической формы в другую при нагреве чистого металла сопровождается поглощением тепла и происходит при постоянной температуре. На термической кривой (в координатах температура–время) превращение отмечается горизонтальным участком (рис. 2.10). При охлаждении происходит выделение тепла (выделение скрытой теплоты превращения) теоретически при такой же температуре, что и при нагреве, но практически при несколько более низкой вследствие переохлаждения.

Явление полиморфизма основано на приведенном выше едином законе об устойчивости состояния с наименьшим запасом энергии. Запас свободной энергии зависит от температуры. Поэтому в одном интервале температур более устойчивой является модификация α , а в другом – модификация β и т.д. Температура, при которой осуществляется переход из одной модификации в другую, носит название температуры полиморфного (аллотропического) превращения. Так, железо имеет две температуры полиморфного превращения: 911 и 1392° С.

Новые аллотропические формы образуются в результате зарождения центров и роста кристаллов аналогично кристаллизации из жидкого состояния. Кривые зависимости с.к. и ч.ц. от степени переохлаждения для аллотропического превращения имеют тот же вид, что и для кристаллизации из жидкого состояния (рис. 2.5). Следует отметить большую склонность к переохлаждению при аллотропических превращениях в твердом состоянии. В качестве общей закономерности можно указать, что высокотемпературная модификация, как правило, имеет более простое атомно-кристаллическое строение и более высокую пластичность (Е.М. Савицкий).

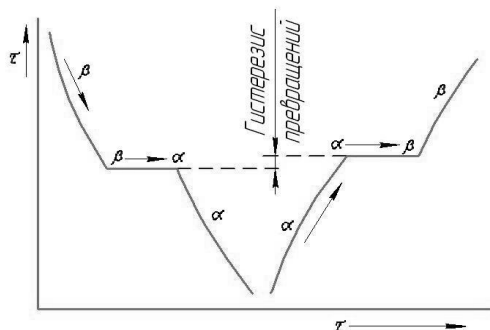


Рис. 2.10. Кривые охлаждения и нагрева металла, имеющего аллотропические превращения

Аллотропические превращения различных металлов имеют свои особенности.

Аллотропия олова. Олово существует в двух модификациях. Ниже $+18^{\circ}\text{C}$ устойчиво так называемое серое α -олово. При охлаждении α -олово появляется на обыкновенном белом олове (β -модификация) в виде отдельных бугорков на поверхности (так называемая «оловянная чума»). Решетка белого олова с координационным числом 6 в полтора раза компактнее решетки серого олова, имеющего решетку алмаза с координационным числом 4. Поэтому превращение белого олова в серое сопровождается увеличением объема примерно на 25%. Серое олово представляет собой серый порошок, не обладающий металлическими свойствами. Хотя температура равновесия $\text{Sn}_{\alpha} \leftrightarrow \text{Sn}_{\beta}$ равна $+18^{\circ}\text{C}$, превращение при этой и немного более низкой температуре происходит с весьма малой скоростью. Максимальное значение с. к. получается при переохлаждении $n = 50^{\circ}\text{C}$ (т.е. при минус 32°C), когда с. к. превращения $\beta \rightarrow \alpha$ равняется 0,004мм в час. Ввиду столь малой скорости превращения β -олово весьма склонно к переохлаждению и сравнительно длительное время может сохраняться при температурах ниже 18°C .

Аллотропия железа. Ниже 911°C железо существует в форме α ; при 911°C объемноцентрированная решетка Fe_{α} переходит в гранецентрированную решетку Fe_{γ} , которая при 1392°C вновь превращается в объемно-центрированную α -решетку (рис. 2.11). Высокотемпературную α -модификацию иногда обозначают буквой δ .

Таким образом, одна и та же решетка у железа (кубическая объемно-центрированная) устойчива в двух интервалах температур. Превращение $\gamma \rightarrow \alpha$ сопровождается уменьшением координационного числа кристаллической решетки и уменьшением компактности. Если бы это уменьшение не компенсировалось в значительной степени уменьшением атомного радиуса, то железо должно было бы при превращении $\gamma \rightarrow \alpha$ увеличиваться в объеме на 9%. На самом деле (благодаря уменьшению атомного радиуса) объем железа увеличивается при этом примерно лишь на 1%. Следует отметить, что структурные напряжения, вызванные даже этим незначительным увеличением объема, имеют большое значение.

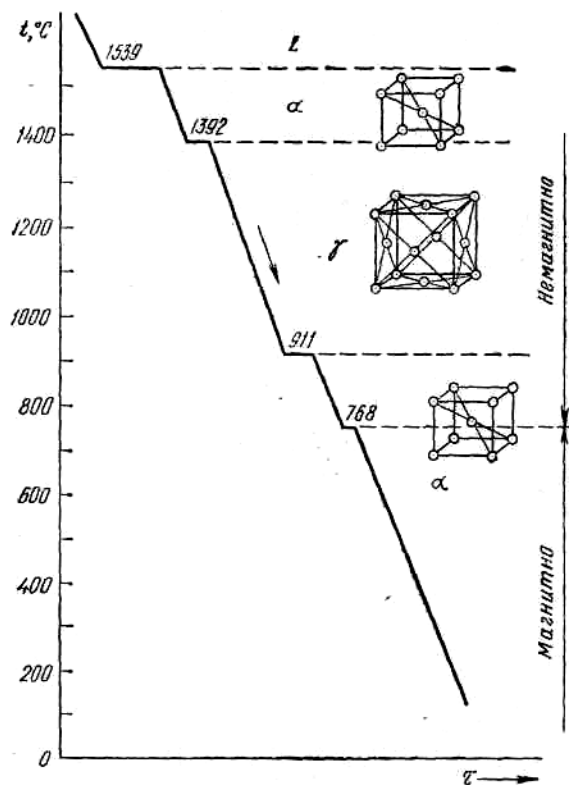


Рис. 2.11. Кривая охлаждения железа

При 768°C получается остановка на кривой охлаждения, связанная не с перестройкой решетки, а с изменением магнитных свойств. Выше 768°C α -железо немагнитное (немагнитное α -железо называют иногда β -железом). Ниже 768°C железо ферромагнитно.

2.6. Магнитные превращения

Некоторые металлы (железо, кобальт, никель) отличаются специфическими магнитными свойствами, например, способностью хорошо намагничиваться. Эти свойства называются ферромагнитными. Однако при нагреве ферромагнитные свойства металла постепенно теряются. Кюри показал, что полная потеря ферромагнитных свойств получается при определенной температуре, названной в дальнейшем точкой Кюри.

Как видно из рис. 2.12, интенсивность намагничивания с повышением температуры постепенно снижается, и точка Кюри соответствует окончательной потере ферромагнетизма. Магнитное превращение имеет ряд особенностей, отличающих его от аллотропического превращения.

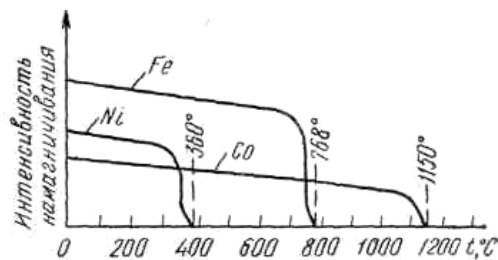


Рис. 2.12. Магнитные свойства железа, никеля и кобальта в зависимости от температуры

Во-первых, магнитные свойства постепенно падают по мере приближения к точке превращения, и эта точка не отвечает скачкообразному изменению свойств. Во-вторых, магнитное превращение не имеет температурного гистерезиса. Увеличение скорости охлаждения не снижает температуры превращения. В третьих, механические и некоторые физические свойства при превращении не изменяются (изменяются многие электрические, магнитные и тепловые свойства). Наконец, в-четвертых, самое важное: магнитное превращение не сопровождается перекристаллизацией — образованием новых зерен и изменением решетки.

Эти особенности существенно отличают магнитное превращение от аллотропического.

Типичными для аллотропического превращения являются изменения кристаллической решетки, перекристаллизация и тепловой гистерезис превращения.

Магнитное превращение не сопровождается ни одним из этих явлений. Следовательно, магнитное превращение есть особый вид превращения, принципиально отличного от аллотропического.

Согласно современным представлениям, при магнитных превращениях происходит изменение не в кристаллической структуре металла, а во взаимодействии внешних и внутренних электронных оболочек атомов.

Глава 3. Физико-химические и литейные свойства железоуглеродистых расплавов

3.1. Физико-химические свойства расплавов

Для квалифицированной разливки стали в изложницы или на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), а также для получения высококачественной отливки из чугуна или стали необходимо знать основные физические и литейные свойства железоуглеродистых расплавов (чугуна и стали), позволяющие характеризовать процессы, происходящие при кристаллизации.

К физико-химическим константам и свойствам, которые необходимо учитывать при рассмотрении процессов разливки черных металлов, формирования структуры слитков и отливок, относится температура плавления, скрытая теплота плавления, теплоемкость жидкого металла, вязкость (табл. 3.1, 3.2).

Приведенные свойства дают представление о количестве тепла, выделяющегося при заливке и затвердевании металла, о зависимости температуры плавления от состава сплава, а также влиянии состава и температуры сплава на его вязкость.

Таблица 3.1

Физико-химические константы железа и его сплавов

Металл, сплав	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	Скрытая теплота плавления, кДж/кг	Средняя теплоемкость жидкого металла, кДж/(кг·К)
Железо (Fe)	1535	273,0	0,92
Сталь (0,3 % C)	1510	268,8	0,80
Сталь (0,8% C)	1420	268,8	0,80
Чугун (3,4 % C; 1,5 % Si; 0,6 % Mn)	1200	231,8	0,97
Чугун (4,2% C; 1,5% Si; 0,7 % Mn)	1150	231,0	0,97

Таблица 3.2

Вязкость железа и его сплавов

Температура, °С	Кинематическая вязкость, мм ² /с	Динамическая вязкость, Па·с	Температура, °С	Кинематическая вязкость, мм ² /с	Динамическая вязкость, Па·с
Fe (примеси 0,060%)			Fe – 0,25% С		
1540	1,1	0,77	1550	0,7	0,49
1600	0,9	0,63	1580	0,6	0,43
1650	0,8	0,56	1700	0,5	0,35
1700	0,75	0,52			
Fe (0,02% С; 0,1% Мn; 0,08 О)			Fe – 0,4% С		
1565	1,09	0,76	1560	0,7	0,51
1590	0,96	0,67	1580	0,70	0,49
1640	0,91	0,64	1610	0,6	0,41
1670	0,81	0,56	1710	0,4	0,29
Fe – 0,2% С			Fe – 0,64% С		
1620	0,65	0,45	1570	0,7	0,48
1670	0,57	0,40	1630	0,6	0,39
1720	0,45	0,31	1650	0,5	0,38
			1700	0,5	0,35

При анализе физико-химических процессов пользуются понятием «система». Системой называют тело или группу тел, находящихся во взаимодействии и мысленно обособляемых от окружающей среды. Она бывает простой и сложной. Простая система состоит из одного какого-либо элемента или химического соединения (компонента). В ней могут происходить лишь физические изменения – переход из одного агрегатного состояния в другое. Например, железо относится к простой системе, оно при нагревании переходит в жидкое, а при охлаждении – в твердое состояние. Температура, при которой происходит изменение агрегатного состояния, называется температурой плавления. В табл. 3.1 показана температура плавления наиболее распространенных сплавов железа.

Сложная система состоит из двух или нескольких элементов или химических соединений. В сложной системе могут происходить физические изменения, а также и химическое взаимодействие входящих в систему элементов или соединений.

К сложным системам можно отнести чугуны и стали, т.е. сплавы на основе железа, содержащие углерод и другие элементы. При нагреве железоуглеродистых сплавов (чугуна и стали) происходит, например, растворение или выделение углерода из раствора в чистом виде, а также в виде химического соединения. В результате изменяются физические свойства сплава.

Системы различают еще как однородные (гомогенные) и неоднородные (гетерогенные). Однородная система имеет одинаковое физическое состояние во всех точках. Такой системой является чистое железо без инородных включений.

В неоднородной системе вещества находятся в различном агрегатном состоянии, они не смешиваются и имеют поверхность раздела (сталь, разливаемая под шлаком). Состояние системы можно представить графически. Такой график называется диаграммой состояния (рис. 3.1).

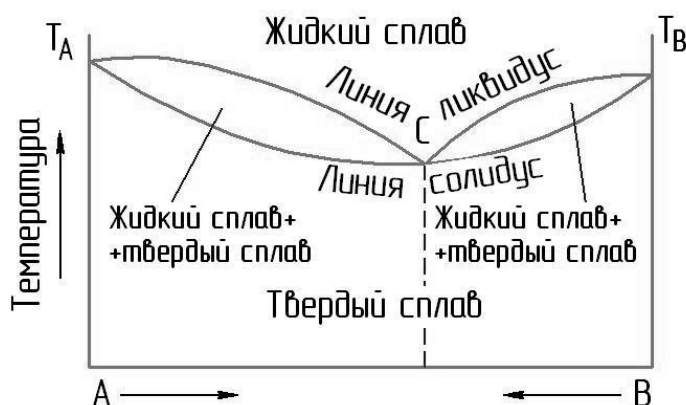


Рис. 3.1. Диаграмма состояния двухкомпонентного сплава, компоненты которого неограниченно растворяются друг в друге в жидком и твердом состояниях и образуют химическое соединение (С)

На диаграммах состояния по оси ординат откладывают значения температуры в градусах, а на оси абсцисс – состав сплавов в процентах. Начало координат соответствует ста процентам одного компонента сплава, конечная точка оси абсцисс соответствует стопроцентному содержанию другого компонента сплава. Все промежуточные точки дают сплавы переменных составов. Диаграммы состояния имеют две основные линии. Верхняя линия, которая соответствует началу затвердевания сплава, называется линией ликвидус (по-гречески слово ликвидус означает жидкое). Нижняя линия, соответствующая концу затвердевания, называется линией солидус, ниже которой сплав находится полностью в

твердом состоянии. Диаграмма состояния может быть двойной, тройной и т. д. по числу компонентов, входящих в состав сплава.

Примером двойной диаграммы состояния является диаграмма состояния железо–углерод.

Поверхностное натяжение, адгезия. Любая жидкость имеет поверхностный слой с особыми свойствами, являющимися следствием проявления сил сцепления молекул или атомов. Молекулы, расположенные в поверхностном слое, находятся в других условиях, чем молекулы внутри жидкости. Молекулы в глубине жидкости со всех сторон окружены подобными себе молекулами, а молекулы поверхностного слоя имеют подобных себе соседей лишь с одной стороны. В результате характер взаимодействия молекул поверхностного слоя отличается от характера взаимодействия молекул внутри жидкости; молекулы поверхностного слоя как бы втягиваются внутрь жидкости. По этой причине увеличение площади поверхности жидкости связано с затратой некоторой работы. Величина работы, затрачиваемая при постоянной температуре, чтобы увеличить на единицу площадь поверхности жидкости и ее насыщенного пара, является мерой поверхностной энергии, называемой поверхностным натяжением. В табл. 3.3 приведены данные поверхностного натяжения железа и его сплавов.

Таблица 3.3

Поверхностное натяжение железа и его сплавов

Температура, °С	Поверхностное натяжение, мН/м	Температура, °С	Поверхностное натяжение, мН/м	Температура, °С	Поверхностное натяжение, мН/м
Fe*		Fe – 0,3% С		Fe – 0,8% С	
1550-1770	1810-0,34×(t-1550)	1550	1850	1550	1660
Fe**		1600	1770	1600	1620
1600	1450	1650	1750	1650	1560
Fe – 0,1% С		1700	1730	1700	1620
1550	1630	Fe – 0,5% С		Fe – 1% С	
1600	1620	1550	1770	1550	1650
1650	1610	1600	1710	1600	1600
1700	1630	1650	1680	1650	1550
		1700	1690	1700	1600

Fe* Чистота 99,988%.

Fe** Содержит, %: С 0,03; Мn 0,15; Si 0,18; Р 0,20; S 0,020; Ni 0,14

Поверхностное натяжение приводит к тому, что поверхность раздела жидкости всегда стремится уменьшиться. Именно с этим связано стремление капелек жидкости или пузырьков газа принимать сферическую форму. Поверхностное натяжение существует и у твердых тел, но его определить очень трудно, так как поверхностные силы сравнительно невелики и не изменяют формы тела.

Помещая различные жидкости на твердые предметы, можно наблюдать, как одни жидкости принимают шарообразную форму, другие – хорошо растекаются.

В первом случае жидкость называется не смачивающей твердое тело, во втором – смачивающей.

Условия равновесия жидкости, соприкасающейся с твердым телом и газом на границе раздела трех фаз: жидкости (ж), газа (г) и твердого тела (т), определяются энергетическими соотношениями в системе, т. е. величиной свободной межфазной энергии. В точке А (рис. 3.2) действуют три силы поверхностного натяжения.

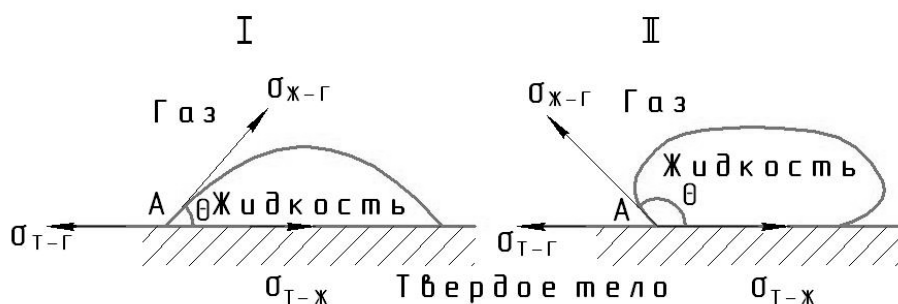


Рис. 3.2. Форма капли жидкости на твердой подложке: I – хорошее смачивание; II – плохое смачивание

$\sigma_{ж-г}$ – поверхностное натяжение на границе раздела жидкость–газ;
 $\sigma_{т-ж}$ – поверхностное натяжение на границе твердое тело–жидкость;

$\sigma_{т-г}$ – поверхностное натяжение на границе твердое тело–газ.

На границе твердое тело–газ действует сила $\sigma_{т-г}$, стремящаяся растянуть каплю вдоль границы твердого тела. В обратном направлении действует сила $\sigma_{т-ж}$. Сила, действующая на границе раздела жидкость–газ $\sigma_{ж-г}$, направлена по касательной к поверхности капли. Эта касательная образует с поверхностью твердого тела в точке соприкосновения трех фаз (А) угол θ , измеряемый условно со стороны жидкости и называемый краевым углом, или углом смачивания. Усло-

вие равновесия капли в точке А будет определяться следующим уравнением:

$$\sigma_{\text{т-г}} = \sigma_{\text{т-ж}} + \sigma_{\text{ж-г}} \cos \theta . \quad (3.1)$$

Для количественной оценки смачиваемости за меру смачивания принимают величину угла θ , реже $\cos \theta$.

По величине угла θ определяется характер смачивания жидкостью твердого тела. Различают смачивание положительное и отрицательное. Положительное смачивание будет тогда, когда краевой угол не превышает 90° ; отрицательное смачивание – когда краевой угол более 90° .

Тесно связана с поверхностным натяжением другая производственная характеристика – адгезия.

Для того чтобы разорвать две несмешивающиеся жидкости по границе их касания, необходимо затратить работу, равную сумме поверхностных натяжений каждой из жидкостей за вычетом поверхностного натяжения на границе жидкость–жидкость. Такая работа называется работой адгезии.

$$\sigma_{\text{ж}'-\text{ж}''} A_{\text{адг}} = \sigma_{\text{ж}'-\text{г}} + \sigma_{\text{ж}''-\text{г}} - \sigma_{\text{ж}'-\text{ж}''}, \quad (3.2)$$

где $A_{\text{адг}}$ – работа адгезии; $\sigma_{\text{ж}''-\text{г}}$ – поверхностное натяжение на границе первая жидкость – газ; $\sigma_{\text{ж}'-\text{г}}$ – поверхностное натяжение на границе вторая жидкость – газ; $\sigma_{\text{ж}'-\text{ж}''}$ – поверхностное натяжение на границе первой и второй жидкостей.

Для того чтобы оторвать жидкость от твердого тела на границе их соприкосновения, необходимо затратить работу, равную сумме поверхностного натяжения на границе жидкость–газ и на границе твердое тело–газ за вычетом поверхностного натяжения на границе жидкость – твердое тело.

$$A_{\text{адг}} = \sigma_{\text{ж-г}} + \sigma_{\text{т-г}} - \sigma_{\text{ж-т}}. \quad (3.3)$$

Работу адгезии на границе твердое тело–жидкость можно вычислить через краевой угол смачивания.

$$A_{\text{адг}} = \sigma_{\text{ж-г}} (1 + \cos \theta). \quad (3.4)$$

Как для границы жидкость–жидкость, так и для границы твердое тело–жидкость работа адгезии тем больше, чем меньше межфазное натяжение.

Вязкость. При движении жидкости, например воды в стеклянной трубке, скорость течения в различных точках будет различной. Наименьшая скорость движения воды будет у стенок сосуда; чем дальше вглубь расположен слой воды, тем больше будет его скорость. Такое состояние жидкости не является равновесным, и в ней будут происходить явления, стремящиеся выровнять скорости течения. Эти явления называются внутренним трением, или вязкостью. Они возникают в результате наличия сил сцепления между стенками канала и жидкостью, а также между частицами самой жидкости. Таким образом, под вязкостью понимают внутреннее трение, которое возникает между отдельными слоями жидкости, перемещающимися с различными скоростями. Единицей вязкости считается вязкость такой жидкости, в которой сила в 1 Н перемещает слой жидкости в 1 м² по отношению к другому такому же слою, находящемуся на расстоянии 1 мм, со скоростью 1 м/с.

Коэффициенты вязкости железа и жидкой стали приведены в табл. 3.2.

Отношение динамической вязкости к плотности жидкости называется кинематической вязкостью. Размерность кинематической вязкости м²/с, выражена формулой

$$\nu = \eta/\rho. \quad (3.5)$$

3.2. Диаграмма состояния железо–углерод

Основными составляющими элементами стали и чугуна являются железо и углерод. Диаграмма равновесия сплавов Fe–C представляется обычно в двух вариантах: метастабильном (неустойчивом) и стабильном (устойчивом) (рис. 3.3, табл. 3.4). В первом случае углерод связан в цементит, во втором – выделяется в свободном состоянии в виде графита.

Таблица 3.4

Положение критических точек на двойной диаграмме сплавов
Fe–C (см. рис. 3.3)

Точка	Температура, °C	Массовая концентрация углерода, %
Стабильная и метастабильная система		
A	1539	0,00
B	1499	0,53
I	1499	0,16
H	1499	0,11
N	1400	0,00
G	910	0,00
Метастабильная система		
C	1147	4,30
D	~1260	6,67
E	1147	2,14
P	727	0,033
S	727	0,80
K	727	~6,67
Стабильная система		
C'	1153	4,23
D'	4000	~100
E'	1153	2,11
F'	1153	100
P'	738	0,03
S'	738	0,69
K'	738	~100

Основные превращения в сплавах Fe–C для метастабильного равновесия представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Основные превращения в железоуглеродистых сплавах при медленном нагреве и охлаждении (рис. 3.3)

Линия	Температура превращения, °С	Сущность превращения	Обозначение критических точек	
			при нагреве	при охлаждении
PSK	727	Превращение перлита в аустенит Превращение аустенита в перлит	Ac ₁ –	– Ar ₁
–	768	Потери магнитных свойств для сталей, содержащих до 0,5% С Возникновение магнитных свойств для тех же сталей	Ac ₂ –	– Ar ₂
GS	910–727	Окончание растворения феррита в аустените в доэвтектоидных сталях Начало выделения феррита из аустенита в доэвтектоидных сталях	Ac ₃ –	– Ar ₃
SE	727–1147	Окончание растворения цементита в аустените в заэвтектоидных сталях и чугунах Начало выделения цементита в аустените в заэвтектоидных сталях и чугунах	Ac _m –	– Ar _m

Окончание таблицы 3.5

Линия	Температура превращения, °С	Сущность превращения	Обозначение критических точек	
			при нагреве	при охлаждении
JE	1147–1499	Начало плавления стали при нагреве и окончании затвердевания при охлаждении (линия солидус)	–	–
ESF	1147	Начало плавления чугуна при нагреве и окончании его затвердевания при охлаждении (эвтектическая линия)	–	–
ABC	1539 – 1147	Окончание расплавления стали и доэвтектического чугуна при нагреве, начало их затвердевания при охлаждении (линия ликвидус)	–	–
CD	1147 – 1260	Окончание расплавления заэвтектического чугуна при нагреве и начало затвердевания его при охлаждении (линия ликвидус)	–	–

3.3. Металлография стали и чугуна

Согласно диаграмме состояния, показанной на рис. 3.3, в сплавах Fe–C при кристаллизации и последующем охлаждении в зависимости от содержания углерода формируются определенные структурные составляющие, которые и определяют свойства полученных сплавов. В зависимости от соотношения структурных составляющих стали и чугуна принято делить на ферритные, феррито-перлитные, перлитно-ферритные, перлитные и аустенитные, стали могут быть также мартенситные.

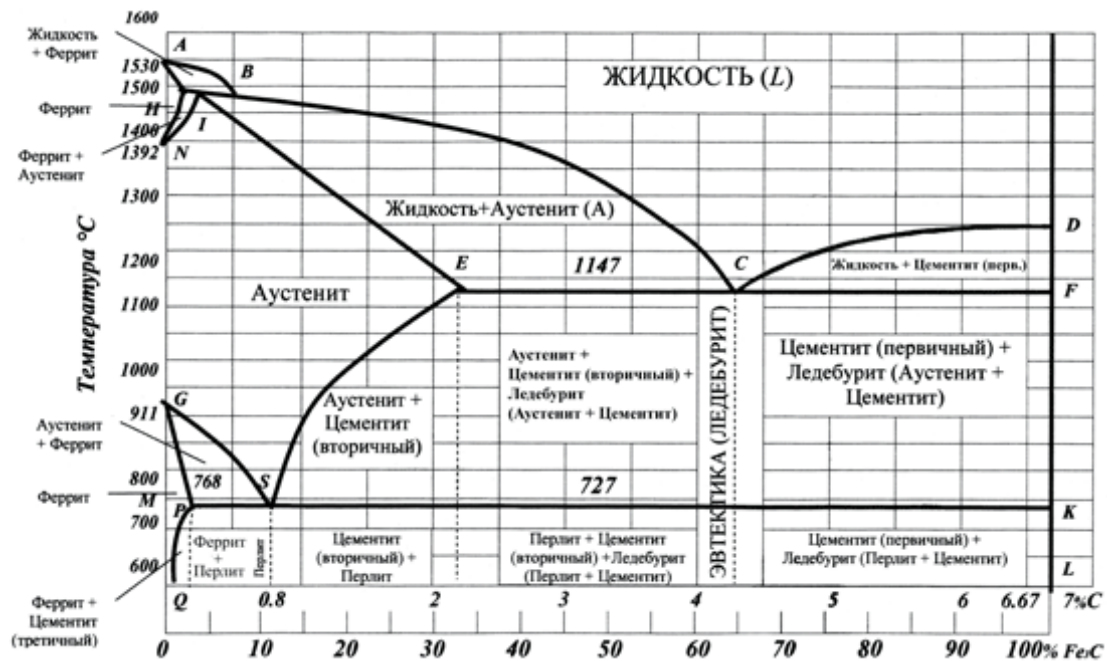


Рис. 3.3. Диаграмма состояния сплавов Fe–C: сплошные линии – метастабильное состояние; пунктиром – стабильное равновесие

От наличия графита различают чугуны: серые, отбеленные (с графитом и небольшим количеством цементита) и белые, в которых полностью отсутствует графит. По форме графита чугуны могут быть с пластинчатым, вермикулярным и шаровидным графитом, а после термической обработки также с компактным графитом (ковкие чугуны). Микроструктуры углеродистых сталей даны в ГОСТ 8233–56, а чугунов – в ГОСТ 3443–77 (рис. 3.4–3.10).

К числу равновесных структур относятся: аустенит – твердый раствор углерода в γ -железе с содержанием углерода до 2 %. Он получается при нагреве стали выше критических температур [выше точек A_{c1} , A_{c3} , A_{cm} и имеет следующие физические свойства: низкая твердость, немагнитный, пластичный, с высоким электрическим сопротивлением, при температурах деформации он более пластичен, чем феррит (рис. 3.5) (здесь и ниже свойства указываются при комнатной температуре)]; *феррит* – твердый раствор углерода в α -железе с содержанием углерода до 0,04%. Он получается при медленном охлаждении доэвтектоидной стали ниже точки A_{c3} с выделением из аустенита и имеет следующие физические свойства: очень пластичный ($\delta = 50\%$; $\psi = 80\%$; $\sigma_B = 250$ МПа; $\sigma_T = 120$ МПа); магнитный, с низкой твердостью (НВ 80–100) (рис. 3.5); *цементит* – химическое соединение железа с углеродом – карбид железа (Fe_3C). Он получается при быстром охлаждении жидкого и твердого растворов и имеет следующие физические

свойства: хрупкий, магнитный ниже температуры $210\text{ }^{\circ}\text{C}$, имеет очень высокую твердость НВ 745–760 (рис. 3.6); *перлит* (пластинчатый, зернистый) – эвтектоидная смесь цементита с ферритом; он образуется при распаде аустенита ниже температуры $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ и имеет следующие физические свойства: более твердый и прочный, чем феррит, но менее пластичный, магнитный (рис. 3.7, а, б); *ледебурит* – эвтектическая смесь аустенита и цементита (4,3% С). Он образуется при затвердевании жидкого сплава с содержанием более 2,14 % С при температуре ниже 1147°C и является хрупким материалом (рис. 8); графит (С) – выделение углерода из расплава в несвязанном виде в пластинчатой, вермикулярной, шаровидной формах (рис. 3.9, а–б). Он образуется при затвердевании жидкого сплава с содержанием более 2,1 % С при температуре ниже 1153°C и имеет следующие физические свойства: непрочный, мягкий, с низкой пластичностью и теплопроводностью.

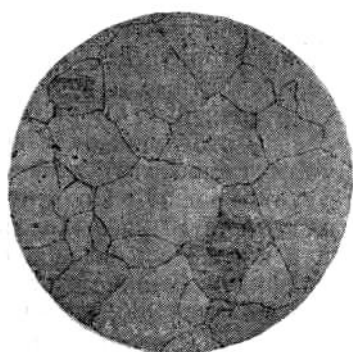


Рис. 3.4. Аустенит

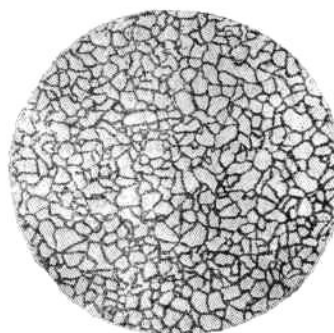


Рис. 3.5. Феррит

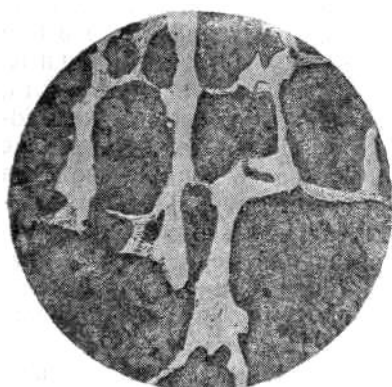


Рис. 3.6. Цементит



Рис. 3.7. Зернистый (а) и пластинчатый (б) перлит

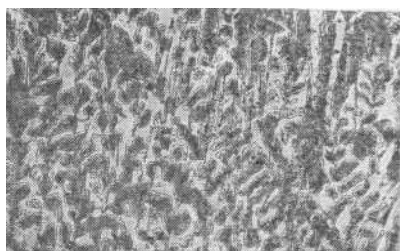


Рис.3.8. Ледебурит

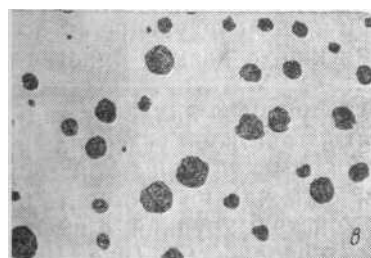


Рис. 3.9. Пластинчатый (а), вермикулярный (б) и шаровидный (в) графит

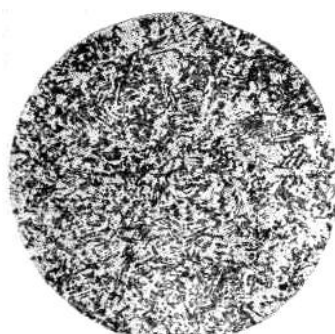


Рис. 3.10. Мартенсит

Таблица 3.6

Объемные характеристики структурных составляющих

Структурная составляющая	Средний температурный коэффициент расширения		Удельный объем, см ³ /г (приведенный к t = 20 °С)
	линейного $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	объемного $\beta \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	
Феррит	14,5	43,5	0,12708
Аустенит	23,0	70,0	0,12277
0,2% С	—	—	0,12270
0,8% С	—	—	0,12399
1,4% С	—	—	0,12528
Мартенсит			
0,2% С	—	—	0,12761
0,8% С	11,5	35,0	0,12915
1,4% С	—	—	0,13061
Цементит	12,5	37,5	0,13023

Характерной неравновесной структурой является мартенсит – пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе с искаженной кристаллической решеткой. Он образуется при очень быстром охлаж-

дении аустенита и имеет следующие физические свойства: хрупкий, с высокой твердостью и низкой теплопроводностью (рис. 3.10).

Для понимания происхождения внутренних напряжений в слитках и отливках необходимо иметь данные по объемным характеристикам структурных составляющих железоуглеродистых сплавов – коэффициентам расширения и удельным объемам (табл. 3.6).

Глава 4. Типы машин непрерывного литья заготовок

Наиболее распространенные машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) работают по следующей схеме: жидкая сталь поступает в сквозную водоохлаждаемую изложницу-кристаллизатор. Предварительно до начала разливки в кристаллизатор вводят искусственное подвижное дно (так называемую «затравку») (рис. 4.1). Жидкий металл, соприкоснувшись с холодной затравкой и кристаллизатором, начинает кристаллизоваться; затравку вместе с застывшим на ней металлом медленно опускают из кристаллизатора; вместе с затравкой тянется и получающийся таким образом слиток. Закристаллизовавшиеся грани слитка (средняя часть слитка еще жидкая) скользят при этом по стенкам кристаллизатора. Для уменьшения усилий вытягивания и исключения случаев разрыва корочки из-за приваривания ее к стыкам кристаллизатора последнему придают возвратно-поступательное движение, на его стенки подают смазку, на поверхности жидкого металла в кристаллизаторе наводят шлак, тонкая пленка которого между кристаллизатором и слитком уменьшает трение. Выходящую из кристаллизатора заготовку (слиток) с жидкой сердцевинкой подвергают интенсивному охлаждению (обычно тонкораспыленными струями воды, подаваемой через специальные форсунки). Это охлаждение называют *вторичным* (*первичным* называют охлаждение в кристаллизаторе). После затвердевания по всему сечению заготовка поступает на участок резки, где ее разрезают на мерные длины (части заданной длины).

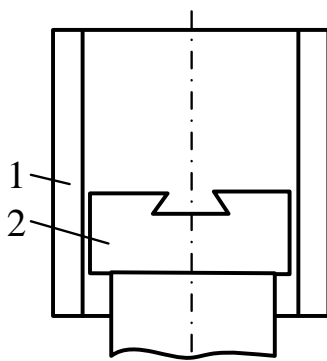


Рис. 4.1. Затравка: 1 – кристаллизатор; 2 – головка затравки

В зависимости от формирующих отливку устройств принято различать два типа непрерывного литья: 1) в неподвижный или качающийся кристаллизатор скольжения, из которого непрерывно вытягивается

закристаллизовавшийся слиток (заготовка) – с разливкой с использованием кристаллизатора; 2) в желоб (ручей) между движущимися лентами или другими движущимися формами (кристаллизаторами) либо непосредственно в валки – с разливкой без кристаллизатора.

Первый вид установок непрерывной разливки стали (рис. 4.2) условно можно разделить на шесть основных типов: с вертикальным кристаллизатором (установки 1 – 3), с криволинейным кристаллизатором (установки 4, 5), с горизонтальным кристаллизатором (6).

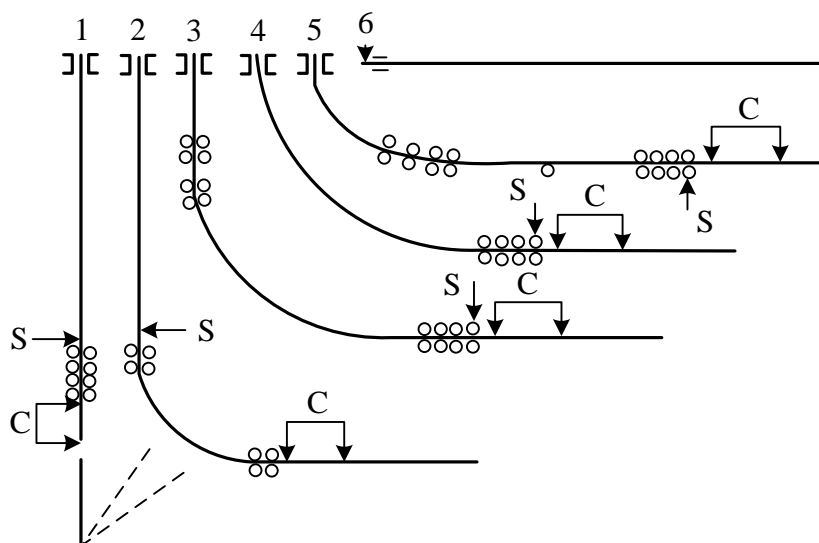


Рис. 4.2. Принципиальные схемы установок непрерывной разливки стал: 1 – вертикального типа; 2 – вертикального типа с изгибом; 3 – с вертикальным кристаллизатором с короткой вертикальной частью и последующим изгибом по определенному радиусу; 4 – радиального типа; 5 – с изогнутым кристаллизатором и возрастающим радиусом изгиба (криволинейного типа); 6 – горизонтального типа; С – зона порезки заготовки; S – конец затвердевания

Если из металла одной плавки получают один слиток (одну заготовку), который затем извлекают, то разливку принято называть *полунепрерывной*. По форме кристаллизатора машины делятся на: блюмовые (крупное прямоугольное сечение), сортовые (мелкое квадратное или круглое сечение), слябовые (прямоугольного сечения с узкой гранью).

4.1. МНЛЗ вертикального типа

На первом этапе в промышленном масштабе применяли установки в основном вертикального типа (рис. 4.3). При получении на таких установках заготовок относительно большой толщины зона полного затвердевания и соответственно участок резки заготовки на мерные длины находятся на большом удалении от кристаллизатора. В результате

установка должна быть или очень высокой (более 40 м) и на такую высоту необходимо поднимать ковш со сталью, или при размещении ковша на небольшой высоте (над уровнем пола цеха) всю установку располагать на очень большой глубине, а порезанные заготовки выдавать затем наверх. Как правило, для уменьшения высоты здания и упрощения системы подачи сталеразливочных ковшей к месту разлива МНЛЗ вертикального типа располагали на небольшой высоте над уровнем цеха, а основное оборудование размещали в глубоком железобетонном колодце. Помимо повышения стоимости строительства это приводило к необходимости применения сложных систем выдачи из колодца порезанных заготовок, создавало серьезные затруднения в случае прорыва корки слитка и при аварийной разливке и т. д.

Принципиальная схема затвердевания непрерывного слитка приведена на рисунке 1.4. Технология и организация непрерывной разливки определяются в числе прочих таким показателем, как глубина (высота, длина) столба жидкой фазы (или так называемой жидкой лунки). Глубина жидкой фазы L (м) пропорциональна скорости разливки v (м/мин) и квадрату условного радиуса сечения слитка (заготовки) $R_{сл}$ (м), т.е. $L = k R_{сл}^2 v$, где k – коэффициент, зависящий от условий разливки и охлаждения, формы сечения слитка и т.д. Полная продолжительность кристаллизации (затвердевания) слитка составляет $\tau_{кр} = k R_{сл}^2$. Таким образом, скорость разливки при прочих равных условиях определяет длину зоны кристаллизации.

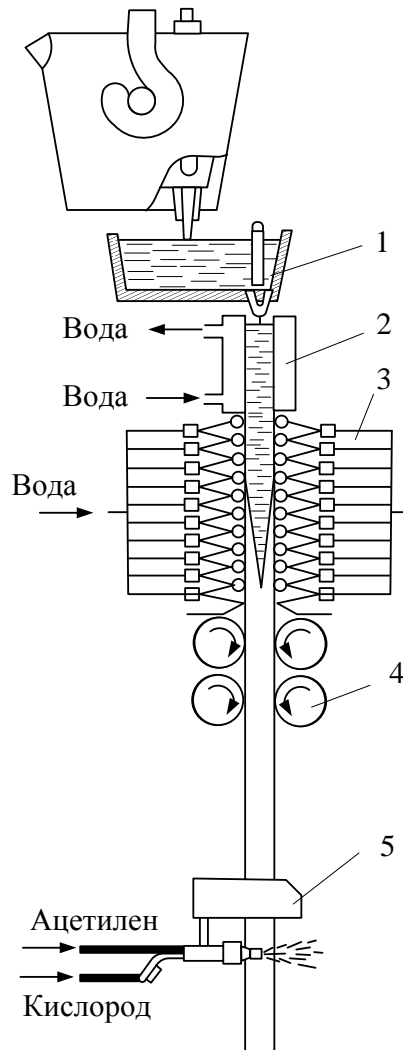


Рис. 4.3. Схема МНЛЗ вертикального типа: 1 – промежуточный ковш; 2 – кристаллизатор; 3 – вторичное охлаждение; 4 – тянущие валки; 5 – газорезка

Повышение скорости разливки путем увеличения длины зоны кристаллизации на установках вертикального типа осуществить трудно, так как с увеличением высоты незакристаллизовавшегося столба металла растет и ферростатическое давление, что может привести к выпучиванию корочки слитка и ее разрушению. Нежелательно также и увеличение высоты установки. В настоящее время МНЛЗ вертикального типа почти не строят. Исключение составляют установки для разливки специальных сталей, слитков специальных профилей, пустотелых трубных заготовок и т. п. Стремление уменьшить высоту привело к созданию МНЛЗ вначале радиального, затем криволинейного и горизонтального типов.

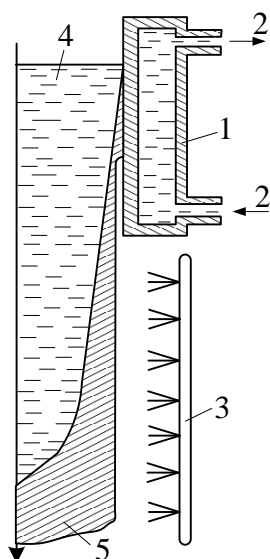


Рис. 4.4. Схема затвердевания непрерывного слитка: 1 – кристаллизатор (первичное охлаждение); 2 – подвод и отвод воды для охлаждения кристаллизатора; 3 – система вторичного охлаждения (форсунки для подачи воды на поверхность слитка); 4 – уровень жидкого металла в кристаллизаторе; 5 – закристаллизовавшаяся часть слитка

Использование МНЛЗ радиального и криволинейного типов (т.е. с изгибом заготовки в процессе кристаллизации), у которых не полностью затвердевшая заготовка выходит на горизонтальный участок, позволяет значительно повысить скорость разливки при крупных сечениях слитка, так как участок резки заготовки на мерные длины может быть расположен на достаточно большом расстоянии от кристаллизатора (30 – 40 м и более).

Организация равномерного затвердевания непрерывнолитого слитка, изгибаемого в процессе кристаллизации, связана с решением ряда сложных проблем. Главной является то, что одновременно одна (внешняя) часть изгибаемой заготовки испытывает растягивающие напряжения, а другая (внутренняя) – сжимающие. Решением этой проблемы являются: а) рафинирование металла от вредных примесей (прежде всего примесей, снижающих прочность тонкой корочки кристаллизующегося слитка); б) разливка металла в строго определенном температурном интервале; в) соответствующий выбор оборудования.

Для вытягивания заготовки служит система роликов (роликовая проводка); ролики прижимаются к вытягиваемой заготовке посредством гидравлических механизмов. Прижатие роликов может осуществляться также при помощи пружинных механизмов. Помимо роликовой системы вытягивания слитка существует также система шагающих балок,

при которой вытягивание (и одновременно вторичное охлаждение) осуществляется при помощи плоских кристаллизаторов, попеременно прижимающих выходящую из кристаллизатора заготовку и перемещающих ее вниз.

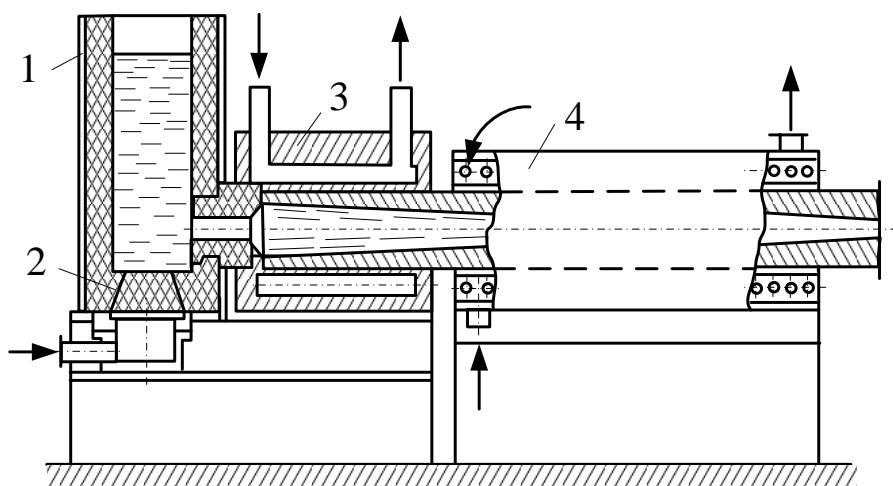
Наибольшее распространение получили МНЛЗ с роликовой системой проводки. Ролики, предназначенные для организации направления движения заготовки и предотвращения ее выпучивания, называют *направляющими*, а те, которые предназначены для вытягивания заготовки из кристаллизатора, называют *тянущими* (иногда *тянущими вальцами*). МНЛЗ, на которых одновременно вытягивается только одна заготовка, называют *одноручьевыми*. Если на установке одновременно вытягивается несколько заготовок (обычно меньшего сечения), то МНЛЗ называют *многоручьевой* (одновременно на установке можно получать от двух до восьми заготовок).

4.2. МНЛЗ горизонтального типа

Создание установок горизонтального типа позволяет решать ряд как экономических, так и организационных проблем: 1) снижение капитальных затрат; 2) возможность размещения установок в действующих цехах, так как для этого не требуется строительство колодцев и башен; 3) уменьшение эксплуатационных затрат благодаря удобству обслуживания, так как все оборудование расположено на уровне пола цеха; 4) возможность совмещения установки непрерывной разливки с прокатным станом.

Горизонтальные МНЛЗ лучше выполнять *наклонными*. Некоторый наклон улучшает условия удаления газов из кристаллизатора при заливке первой порции металла, а также улучшает процесс окончания разливки. При строго горизонтальном положении кристаллизатора и опускании в конце разливки уровня мениска в металлоприемнике до верхней образующей кристаллизатора необходим этап прекращения разливки и ожидания полного затвердевания слитка.

В настоящее время в мире работают десятки горизонтальных МНЛЗ различных конструкций. Наиболее распространены конструкции, у которых процесс получения заготовки основан на принципе периодического ее вытягивания из неподвижного кристаллизатора (рис. 4.5), жестко соединенного через торцовую стенку с металлоприемником. Организация управления циклом вытягивание – обратный ход на отдельных установках различается. Частота цикла достигает 200 цикл/мин (иногда до 300 цикл/мин, что требует особого внимания к качеству изготовления оборудования).



*Рис. 4.5. Схема горизонтальной МНЛЗ конструкции УкрНИИмета:
1 – металлоприёмник; 2 – пористая пробка для продувки металла инертным газом;
3 – кристаллизатор; 4 – индуктор*

Ответственными узлами горизонтальной МНЛЗ являются металлоприемник, кристаллизатор и соединение металлоприемника с кристаллизатором. Вместимость и конструкция металлоприемника должны обеспечить: 1) стабильную подачу металла в кристаллизатор; 2) условия для всплытия неметаллических включений; 3) предотвращение вторичного окисления металла; 4) возможность прекращения подачи металла в кристаллизатор в любой момент разливки (прекращение разливки, аварийная ситуация и т.п.).

На рис. 4.6 показана схема металлоприемника МНЛЗ, снабженного шиберным затвором, индуктором и крышкой. Одной из наиболее ответственных деталей МНЛЗ является так называемое разделительное кольцо, соединяющее металлоприемник с кристаллизатором. К материалу этой детали предъявляют особо высокие требования, поскольку кроме высокой точности размеров эта деталь должна обладать высокой термической стойкостью, стойкостью к разрушениям, налипанию металла и включений, низким температурным коэффициентом линейного расширения и другими свойствами. Обычно для изготовления разделительных колец используют такие дорогостоящие и дефицитные материалы, как порошки нитрида бора (BN), иногда нитрида кремния (Si_3N_4), испытывают новые материалы типа SIALON ($\text{Si}_x\text{Al}_y\text{ON}_z$). Затраты на изготовление и эксплуатацию разделительных колец существенно влияют на экономичность работы МНЛЗ. Более дорогостоящим, чем для обычных МНЛЗ, является и кристаллизатор МНЛЗ. Типы и конструкции кристаллизаторов различны. На некоторых МНЛЗ используют кристаллизаторы с несколькими (например, тремя) зонами теплоотвода.

Первая зона – кольцо из нитрида бора, вторая (образование корочки заготовки) – из медно-бериллиевого сплава с высокой твердостью и износостойкостью, третья – графитовая вставка. Поскольку теплопроводность графита ниже, чем меди, обеспечивается равномерное распределение температур по сечению заготовки. Графит уменьшает также силы трения между заготовкой и кристаллизатором.

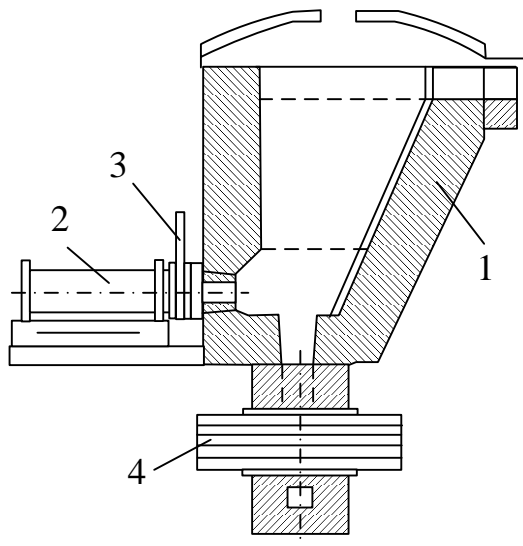


Рис.4.6. Металлоприемник горизонтальной МНЛЗ конструкции фирмы «ФЕСТ-Альпине: 1 – корпус; 2 – кристаллизатор; 3 – шиберный затвор; 4 – индуктор для подогрева металла»

Схема образования корочки при кристаллизации в горизонтальной МНЛЗ отличается от схемы, характерной для вертикальных кристаллизаторов (рис. 4.7). Более высокое, чем в вертикальных кристаллизаторах, ферростатическое давление обеспечивает лучший контакт с металлом горизонтального кристаллизатора. В связи с этим интенсивность отвода тепла от металла в горизонтальном кристаллизаторе выше (примерно в 1,5 раза); соответственно длина горизонтальных кристаллизаторов обычно меньше, чем вертикальных (коэффициент затвердевания стали в горизонтальных кристаллизаторах достигает $26 - 30 \text{ мм/мин}^{0,5}$).

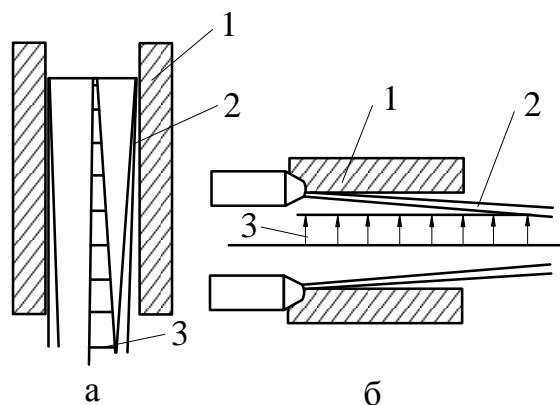


Рис. 4.7. Распределение ферростатического давления в вертикальном (а) и горизонтальном (б) кристаллизаторах: 1 – кристаллизатор; 2 – корочка слитка; 3 – ферростатическое давление

На рисунке 4.8 показана схема горизонтальной МНЛЗ, разработанная ВНИИметмашем. Особенностью установки является то, что в ней фронт кристаллизации перемещается не в одном направлении, как у обычных установок, а в двух, причем противоположных, направлениях. Такой способ разливки исключает образование неравномерной структуры заготовки. Медный водоохлаждаемый

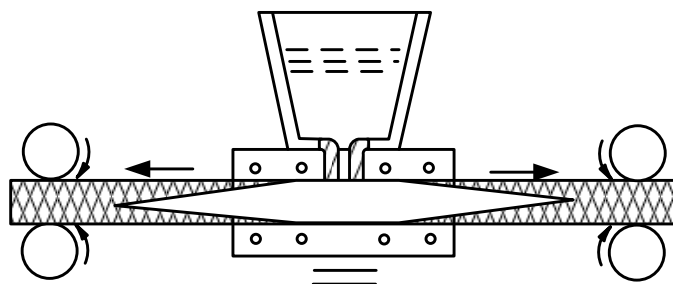


Рис. 4.8 Схема МНЛЗ с двусторонним вытягиванием заготовки конструкции ВНИИМЕТМАШ

кристаллизатор совершает возвратно-поступательные движения. Скорость вытягивания заготовки регулируют таким образом, чтобы фронт кристаллизации начинался на некотором расстоянии от отверстия питателя. Общая длина кристаллизатора при отливке заготовок сечением 150×150 мм составляет 1200 – 1500 мм. После выхода из кристаллизатора заготовка попадает в зону вторичного охлаждения душирующего типа. Установка получила название «Горизонт».

Разливка под давлением заключается в подаче жидкой стали вверх в кристаллизатор для получения заготовки. Жидкий металл проталкивают (выдавливают) в этот кристаллизатор из ковша, помещаемого в

камеру высокого давления, через специальный патрубок. Кристаллизаторы на таких действующих установках водоохлаждаемые графитовые. На заводе фирмы Greusot – Loire Ind. (Франция) такие установки, работающие с 1988 г., используются для получения слябов из специальных сталей толщиной до 400 мм. Сравнительно небольшой объем производства на данном заводе (около 100 тыс. т в год) делает нерентабельным установку обычных МНЛЗ.

4.3. Литейно-прокатные агрегаты

Существуют две основные схемы получения готового проката из непрерывнолитых заготовок: МНЛЗ – чистовой стан; МНЛЗ – заготовочный стан – чистовой стан. Первая схема в большей, степени сокращает цикл металлургического производства, однако ей присущи следующие недостатки: технологические трудности получения заготовок мелкого сечения (невозможность разлива через погружные стаканы, использования шлакообразующих смесей и т.д.); ограничение сортамента проката по мере уменьшения сечения непрерывнолитых заготовок и вместимости сталеплавильного агрегата; увеличение числа ручьев и, следовательно, усложнение конструкции МНЛЗ; уменьшение производительности МНЛЗ; снижение качества готового проката вследствие уменьшения суммарного обжата.

Совмещение непрерывной разлива с прокаткой позволяет устранить перечисленные выше недостатки и обеспечить получение готового проката по схеме литейно-прокатный агрегат (ЛПА) – чистовой стан. На ЛПА можно получать заготовки разных размеров без снижения производительности МНЛЗ, так как сталь разливают в кристаллизатор одного сечения, а получение заготовок заказного размера обеспечивается обжатием в прокатной клети. Это создает благоприятные условия для механизации и автоматизации процесса производства проката из жидкой стали. В результате обжата уплотняется осевая зона непрерывнолитой заготовки, повышаются ее механические свойства. Одной из причин использования совмещенного процесса в металлургии является возможность уменьшения ликвации химических элементов в готовом прокате, так как в непрерывнолитых заготовках не удается полностью устранить осевую ликвацию. Особую остроту эта проблема приобретает при отливке квадратных заготовок из сталей, склонных к карбидной ликвации (например, подшипниковых, рельсовых и т.д.). При совмещении разлива с прокаткой внутренняя температура заготовки высока, вследствие чего уменьшается ее сопротивление деформации. В случае обжата заготовки после ее полного затвердевания при температуре поверхности

1273 К среднее давление металла на валки составляет примерно 7,8 МПа, а в случае обжата с жидкой сердцевиной – всего 3,5 МПа. Таким образом, при совмещении процессов требуется значительно меньшая мощность обжимного стана при сокращении числа проходов. Это позволяет уменьшить габариты и массу прокатного оборудования.

Одной из основных проблем, возникающих при эксплуатации ЛПА, является согласование скоростей разливки и прокатки. Для получения на ЛПА качественных заготовок необходимо учитывать ряд особенностей, свойственных процессу совмещения. Если температура осевой зоны близка к температуре солидуса, то при обжате непрерывнолитой заготовки, вследствие малой пластичности металла могут образовываться внутренние трещины. Небольшой температурный перепад (200 К) в зависимости от марки стали, сечения слитка и т.д. может способствовать увеличению степени деформаций осевой зоны.

Оборудование, применяемое для обжата непрерывнолитой сортовой заготовки при совмещении, можно разделить на две группы: с высокой степенью обжата (60 %) за один проход; с малой степенью обжата (20 – 40 %) за один проход. Стоимость агрегатов с высокой степенью обжата значительна, поэтому они не получили широкого применения. В настоящее время в обжимной группе ЛПА применяют двухвалковые клетки с ящечными калибрами и клетки с последовательно расположенными вертикальными и горизонтальными валками, имеющими гладкую бочку. Вариантом сочетания МНЛЗ с прокатным станом является метод редуцирования литых слябов (уменьшение их ширины при прокатке с вынесением клеток за линию разливки), который дает возможность получать практически неограниченный сортамент листовой и сортовой продукции из литых слябов с соотношением сторон до 1:8 и более. Реверсивный редуцирующий агрегат простейшей конструкции включает одну пару редуцирующих валков с калибрами и одну пару гладких валков. Используемый редуцирующий стан состоит из трех клеток: двух вертикальных (1) и одной горизонтальной (2) (рис. 4.9). При проектировании нового комплекса с МНЛЗ, когда возникает вопрос о выборе оптимального сечения непрерывнолитой заготовки, применение редуцирующего стана облегчает эту задачу.

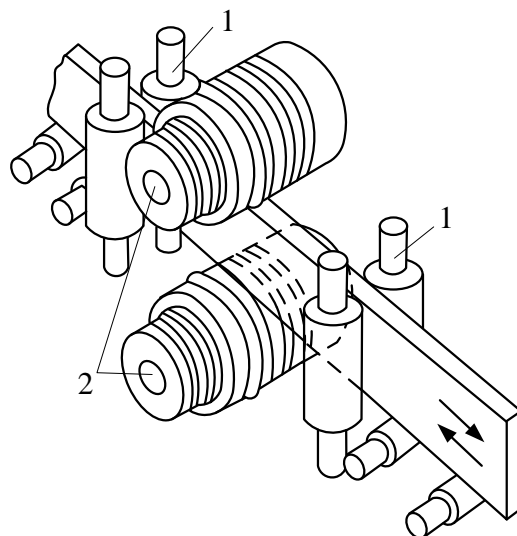


Рис. 4.9. Схема редуцирующего стана

4.4. МНЛЗ для отливки профильных балочных заготовок

В настоящее время имеются две такие МНЛЗ: двух- и четырех-ручьева радиального типа. В связи со сложным сечением заготовки усложняется конфигурация кристаллизаторов (рис. 4.10). При соблюдении оптимального режима вторичного охлаждения и эффективного удержания всех элементов профиля балочной заготовки отливка таких заготовок имеет преимущества перед традиционной технологией: улучшение качества поверхности заготовки; сокращение центральной пористости и серпородности заготовок; повышение прямолинейности торцов порезанных заготовок; сокращение объема зачистки готовых балок; повышение выхода годных балок на 3 %. Недостатки процесса следующие: число сменных кристаллизаторов зависит от числа типоразмеров заготовок; при производстве более 1 млн. т/г число МНЛЗ возрастает; заготовки ограниченного сортамента складировются; балочные заготовки пригодны для получения балок шириной более 0,30 м.

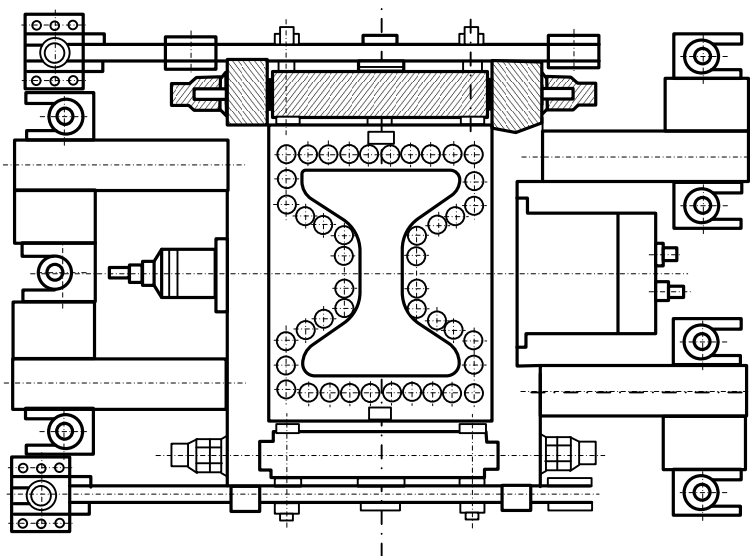


Рис. 4.10. Кристаллизатор для балочной заготовки

4.5. Центробежные МНЛЗ

Центробежная непрерывная разливка характеризуется тем, что заготовка, имеющая жидкую сердцевину, в процессе разливки вращается под действием тянущих валков синхронно с кристаллизатором. Такая разливка имеет ряд преимуществ: жидкая сталь прижимается под действием центробежной силы к стенкам кристаллизаторов по всему их периметру, что обеспечивает формирование заготовки, имеющей гладкую поверхность и равномерную толщину затвердевшей оболочки; образующийся в процессе разливки шлак под действием центробежной силы скапливается в центре вогнутого зеркала металла, что облегчает его удаление, вследствие чего устраняются поверхностные дефекты заготовки в виде шлаковых включений; благодаря вращению заготовки для ее равномерного вторичного охлаждения достаточно иметь несколько рядов водяных форсунок, расположенных по высоте вдоль одной образующей поверхности заготовки. Это обеспечивает отсутствие дефектов, связанных с неравномерным охлаждением, и получение плотной структуры заготовки.

Установка (рис. 4.11) имеет следующие особенности:

1) Металл из промежуточного ковша подается в кристаллизатор по касательной к направлению его вращения. Для подачи металла можно использовать два способа: при помощи шабота или изогнутой трубы (рис. 4.12). Причины, обусловившие применение шабота: при использовании шабота обеспечивается серийная разливка, так как шабот можно быстро заменить в случае размывания разливочного стакана; обеспечи-

вается отдельное регулирование подачи металла в каждый кристаллизатор; обеспечивается одновременная разливка заготовок разных размеров (диам. 0,120 – 0,240 м).

2) Кристаллизатор ввиду плотного прилегания заготовки к его стенкам обеспечивает высокую интенсивность теплоотвода, поэтому имеет незначительную длину (0,455 м). Качание кристаллизатора осуществляется механизмом возвратно-поступательного движения.

3) Система вторичного охлаждения включает водяные форсунки и опорную систему, состоящую из трех рядов вертикальных роликов.

Характерной особенностью структуры заготовок, отлитых на центробежной МНЛЗ, является развитая зона равноосных кристаллов. Образование развитой зоны равноосных кристаллов можно объяснить не столько вращением слитка, сколько дроблением и разделением столбчатых кристаллов под действием струи металла, поступающей в кристаллизатор под углом к затвердевающей оболочке слитка. Поскольку получается развитая зона равноосных кристаллов, осевая пористость не получает значительного развития.

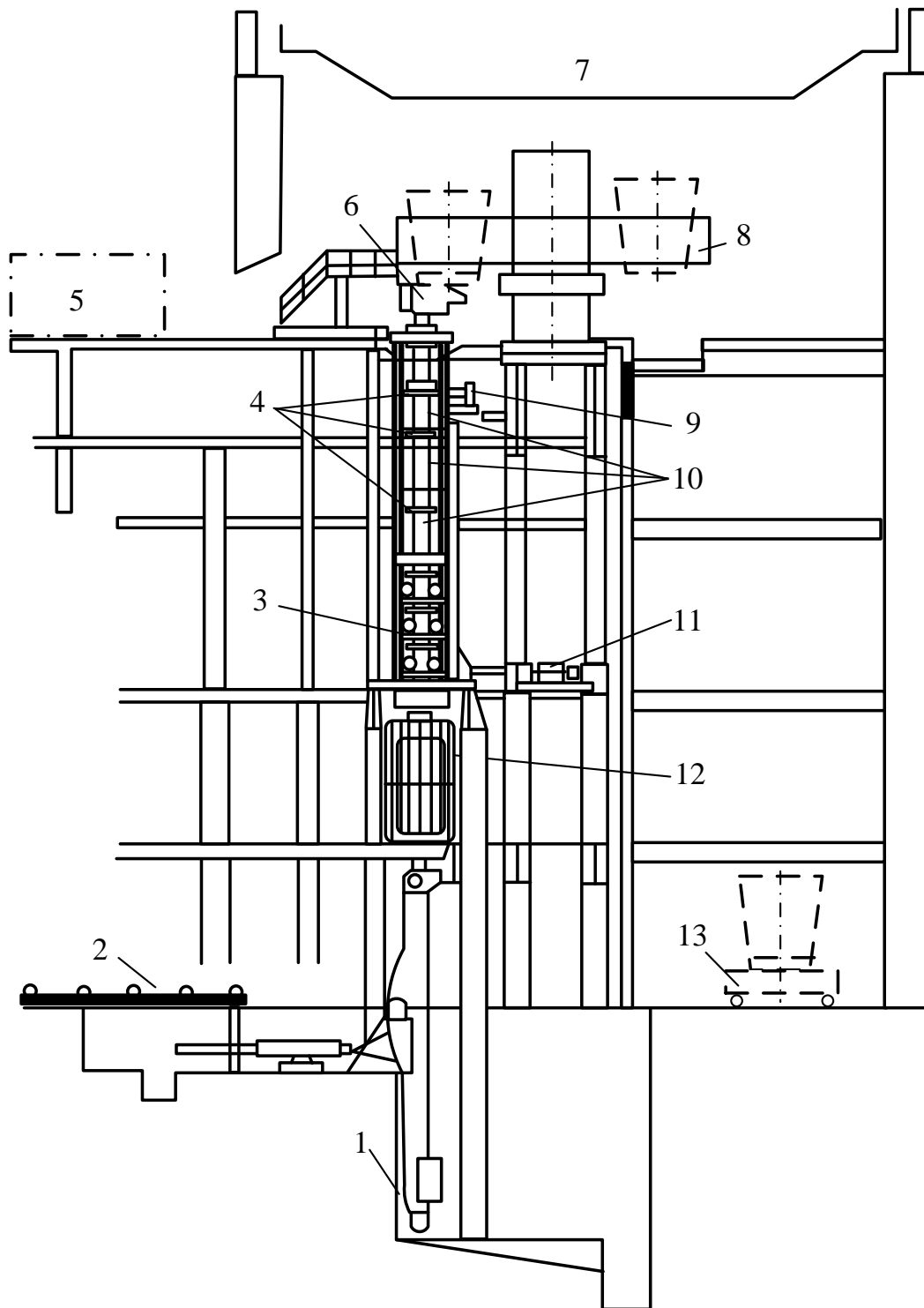


Рис. 4.11. Схема центробежной МНЛЗ: 1 – кантователь; 2 – отводящий рольганг; 3 – тянущая клеть; 4 – направляющие ролики; 5 – пост управления; 6 – промежуточный ковш; 7 – разливочный кран; 8 – поворотный стенд; 9 – механизм качения кристаллизатора; 10 – ЗВО; 11 – привод тянущей клетки; 12 – пила горячей резки; 13 – стелевозная тележка

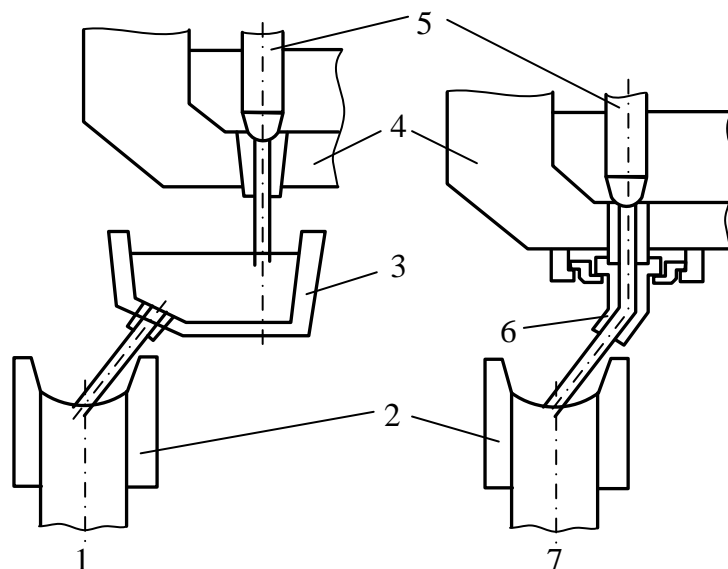


Рис. 4.12. Схема подачи металла при помощи шабота или изогнутой трубы:
 1 – система шабота; 2 – кристаллизатор; 3 – шабот; 4 – промежуточный ковш;
 5 – стопор; 6 – изогнутая труба; 7 – система изогнутой трубы

4.6. МНЛЗ для отливки полых трубных заготовок

Технология отливки полых заготовок позволяет получать непрерывным способом заготовки большого диаметра. Способ непрерывной разливки полых заготовок позволяет существенно сократить расходы по переделу при изготовлении труб, в сравнении с известным способом прошивки трубных заготовок на автоматических и пилигримных станах. При прошивке заготовок на прессе ограничивается их масса, а, следовательно, и масса трубы, так как существует максимальное соотношение между длиной заготовки и диаметром пуансона, равное 7:1, которое нельзя превышать ввиду появления эксцентриситета между внутренним и внешним диаметрами заготовки. Непрерывнолитые полые заготовки могут иметь практически любую длину при любом поперечном сечении, что позволяет прокатывать очень длинные трубы, имеющие значительную толщину стенки. Увеличение длины трубы дает возможность сократить отходы на головную и хвостовую обрезь, что увеличивает выход годного.

4.7. Машины полунепрерывной разливки стали (МПНРС)

МПНРС относятся к установкам вертикального типа. МПНРС предназначены для получения слитков ограниченной длины, которые не подвергаются резке на мерные длины под прокатку в процессе разливки. Резка слитков осуществляется вне МПНРС после полного затверде-

вания и выдачи из машины.

Схема МНПРС показана на рис. 4.13. Эта машина предназначена для производства расходуемых электродов из жаропрочных сплавов и легированных сталей. Разливка металла на МНПРС производится аналогично разливке на МНЛЗ через промежуточные ковши или специализированные приемные воронки с подводом металла под зеркало металла в кристаллизаторах при использовании шлакообразующих смесей.

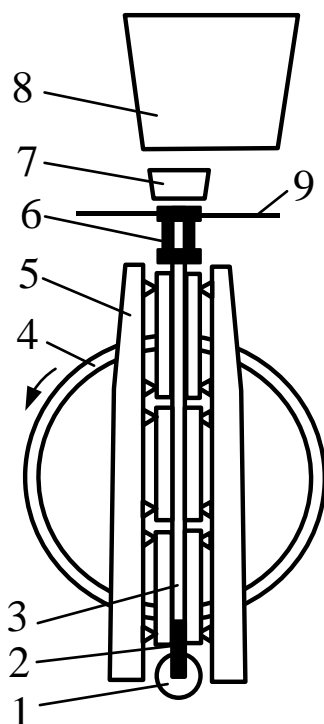


Рис. 4.13. Схема МНПРС: 1 – механизм вытягивания заготовки; 2 – затравка; 3 – слиток; 4 – поворотная рама; 5 – направляющие балки; 6 – кристаллизатор; 7 – разливочное устройство; 8 – сталеразливочный ковш; 9 – разливочная площадка

Перед началом разливки в кристаллизаторы снизу вводят затравки, расположенные на общей траверсе, которая перемещается реечным механизмом вытягивания, помещенным в поворотной раме. В поворотной раме установлены направляющие балки, служащие для удержания слитка в процессе разливки от продольного изгиба и раздутия под воздействием ферростатического давления. На раме смонтирована система водяного вторичного охлаждения слитка. К моменту окончания разливки всей плавки траверса с затравками опускается в крайнее нижнее положение. Слитки выводят из кристаллизаторов, производится выдержка слитков до плотного их затвердевания. После этого осуществляется поворот рамы со слитками на 90 градусов и их выведение из машины в горизонтальное положение.

К МПНРС относятся и горизонтальные МНЛЗ с закрытым кристаллизатором. Характерной особенностью горизонтальной МНЛЗ с закрытым кристаллизатором является неизменное поперечное сечение лунки жидкого металла в течение всего процесса разливки. Это достигается при разливке в кристаллизатор с закрытым дном при его непрерывном удалении от промежуточного ковша. Последовательность операций при горизонтальной непрерывной разливке в закрытый кристаллизатор приведена на рис. 4.14. Непосредственно перед началом разливки к питателю подводят кристаллизатор, дно которого представляет собой медную водоохлаждаемую пробку с болтами, служащими для сцепления кристаллизатора с затвердевшей оболочкой слитка.

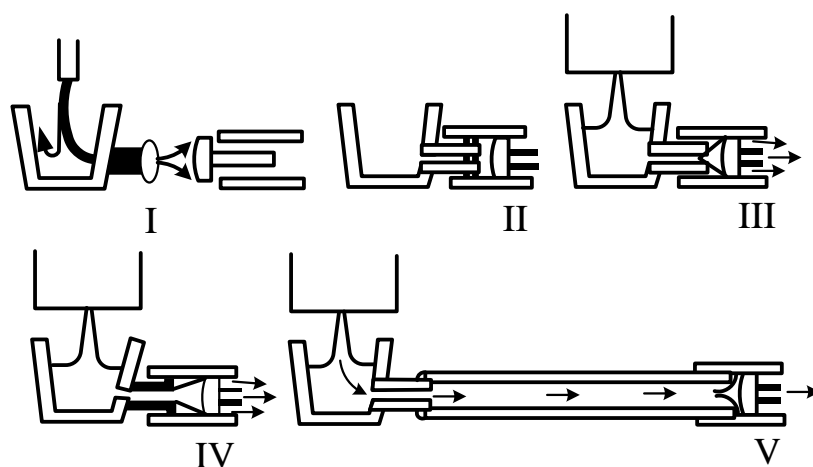


Рис. 4.14. Последовательность литья в закрытый кристаллизатор: I – нагрев промежуточного ковша; II – подвод кристаллизатора; III – заполнение кристаллизатора металлом; IV – начало разливки; V – процесс разливки

При перемещении кристаллизатора на его стенках формируется затвердевшая оболочка слитка. Эта оболочка служит питателем, через который к кристаллизатору непрерывно поступает жидкий металл. Затвердевшая оболочка на выходе из кристаллизатора охлаждается при помощи водяных форсунок. В процессе разливки поперечное сечение лунки жидкого металла остается практически постоянным, так как достигается тепловое и гидродинамическое равновесие в осевой зоне заготовки. Для устранения выпучивания заготовки установка снабжена опорными элементами вторичного охлаждения. Разливка прекращается при полном опорожнении сталеразливочного ковша. МНЛЗ с закрытым кристаллизатором можно применять при разливке легированных сталей с широким интервалом кристаллизации из ковшей сравнительно небольшой вместимости.

4.8. Тонкослябовые установки непрерывной разливки стали

При сооружении этих установок используется принцип совмещенных процессов отливки и прокатки листовых заготовок большой длины, т.е. двух технологий – непрерывного литья заготовки, поперечное сечение которой приближается по параметрам к размерам готового изделия, и непосредственного совмещения процесса разливки с прокаткой тонкой полосы. Схематически это можно представить следующим образом: непрерывное литье тонких заготовок → разделение полосы → подогрев, выравнивание температуры → горячая прокатка → охлаждение, смотка.

Известные разновидности совмещенных процессов литья и прокатки листовых заготовок помещены в таблице 4.1.

Практически полный перечень тонкослябовых (в том числе слябов промежуточной и средней толщины) МНЛЗ приведен в таблице 4.2.

Производственную схему с литьем тонких слябов, впервые примененную на мини-заводе с ориентацией на продукцию класса В, и выход на рынок горячекатаной листовой стали здесь рассматривают как процесс первого поколения, а разработанную позднее схему с литьем слябов средней толщины, ориентированную на продукцию класса А и выше, – как процесс второго поколения.

Таблица 4.1

Совмещенные процессы литья и прокатки листовых заготовок

Процесс	Фирмы, участвующие в разработке процесса
Compact Strip Production (CSP)	Schloemann-Siemag, AG (SMS)
Inline Strip Production (ISP)	Mannesmann Demag, Huttentechnik (MDH)
Thin SlabCast Rolling (TSCR)	Acciaeria Tubificio, Arvedi S.p.A.
Continuous Thin SlabCasting and Rolling (CONROLL)	Voest-Alpine Industrieanlagenbau (VAI)
Casting Pressing Rolling (CPR)	Thyssen Stahl AG, Schloemann-Siemag AG (SMS), Usinor Sacilor
Flexible Thin Slab Conticaster (FTSC)	Danieli & C.S.p.A.

Окончание таблицы 4.1

Процесс	Фирмы, участвующие в разработке процесса
Tippins-Samsung-Praces (TSP)	Tipping Incorporated, Samsung Heavy Industries
QSP-process	Sumitomo Metal Industries, Sumitomo Heavy Industries (SMI/SHI)

Таблица 4.2

Тонкослябовые МНЛЗ

Фирма изготовитель	Предприятия	Год ввода в эксплуатацию	Конечные толщина и ширина, мм	Годовая производительность, млн.т	Толщина сляба, мм
SMI/SHI	North Star/ВНР	1996	1,4, 1200	1,35	90
	TRICO	1997	1,0, 1250	2,0	90/70
	SSM	1998	1,0, 1250	1,5	100/80
MDH	Arvedi	1992	1,2, 1000	0,5	60/40
	POSCO	1996	1,2, 1000	1,8	85/67,5
	IPSCO	1997	1,6	1,0	125
	Saldanha/South Africa	1998	1,0	1,25	90/75
	POSCO	1999	1,0,	2,0	100/80

			1000		
VAI	AVESTA- Sheffield AB	1988	2,0, 1600	0,6	80, 100
	ARMCO Mansfield	1995	1,7, 1200	1,1	80, 100

Продолжение таблицы 4.2

Фирма изготовитель	Предприятия	Год ввода в эксплуатацию	Конечные толщина и ширина, мм	Годовая производительность, млн.т	Толщина сляба, мм
DANIELI	ALGOMA	1997	1,0, 1000	2,0	90
	EL EZZ/ Egypt	1999	-	1,0	90
SMS	NUCOR Crawfordsville	1989	1,95, 1100	1,9	50
	NUCOR Hickman	1992	1,8, 1600	2,0	50
	Hylsa Galiatin Steel	1995 1995	1,0, 1200	0,75	50
			2,1, 1500	1,0	50,70
	Hanbo Steel	19%	1,8, 1600	1,0/2,0	50
	Steel Dynamics	1996/98	1,2, 1240	1,2	50/80
	ACB Spain	1996	1,3,900	0,9	53
	Ispat Nippon Denro	1996/98	1,2, 1150	1,0/2,0	50/60
	ASME	1996	1,25,900	0,9	50
	Tuscaloosa	1997	1,5	0,9	50
	NUCOR	1997	1,5,	1,35	50,70

			1500		
	Nakern Thai	1997	1,2, 1000	1,2	50,70
	Mehas- teel/Malaysia	1998	1,2, 1150	2,0	50/70
	China Special Steel	1999	1,9, 1300	0,8	50
	Thyssen	1999	1,0	1,2	60

Окончание таблицы 4.2

Фирма изготовитель	Предприятие	Год ввода в эксплуатацию	Конечные толщина и ширина, мм	Годовая производительность, млн.т	Толщина сляба, мм
	KS/POSCO	1999	-	1,0	50
	Acciai Speciali	2001	1,0	-	-
	Ispat Industries (Индия)	1998	1,2-6,0	-	50
Tippins, Samsung	Nova Huta	1997	1,5-12,0	1,1	125

Основные характеристики процессов на мини-заводах приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Основные характеристики процессов на мини-заводах

Поколение	1	1,5	2
Разработчик процесса	SMS	MDH	SMI
Металлургическая фирма	Nucor (США)	Arvedi (Италия)	Tricco (США)
Тип кристаллизатора	Воронкообразный, вертикальный	Плоский, вертикальный	Плоский, вертикальный с изгибом
Размер полости кристаллизатора (толщина), мм	50	60	90
Обжатие слитка с жидкой сердцевиной	Нет	Есть, с 60 до 45	Есть, с 90 до 70

Окончание таблицы 4.3

Поколение	1	1,5	2
Тип машины	Вертикальная	Криволинейная	Вертикальная с изгибом
Черновая группа	Нет	Обжимной стан в потоке: три клетки кварто	Непрерывная черновая группа: дуо + кварто
Эджер	Нет	Нет	Есть, встроен в клетку дуо черновой группы
Нагревательная печь	Туннельного типа	Индукционная	Туннельного типа
Промежуточное перемоточное устройство	Нет	Типа Cremona	Вох ППУ
Толщина подката, мм	50	15	17-25
Чистовая группа	Шестиклетевая	Четырехклетевая	Пятиклетевая
Минимальная толщина, мм	2,5	1,5	1,0
Длина линии, м 300	180	377	

Процесс первого поколения – это процесс CSP (Compact Strip Production), разработанный фирмой «Schlemansimag» и впервые реализованный в промышленном масштабе фирмой «Nucor» на заводе «Crawfordswillt» (Крофордсвилл). Процесс предусматривает литье сляба толщиной 50 мм в кристаллизаторе специального профиля (воронкообразном), прямую подачу сляба в нагревательную печь и в чистовую группу стана горячей прокатки с получением горячекатаного рулона для поставки на рынок горячекатаной продукции общего назначения. Процесс специально рассчитан на производство продукции с минимальными затратами на строительство завода и минимальными производственными издержками.

Ниже перечислены основные особенности оборудования, а на

рис.4.15 показана схема производственного процесса. Общая длина производственной линии от МНЛЗ до подпольной моталки составляет около 300 м.

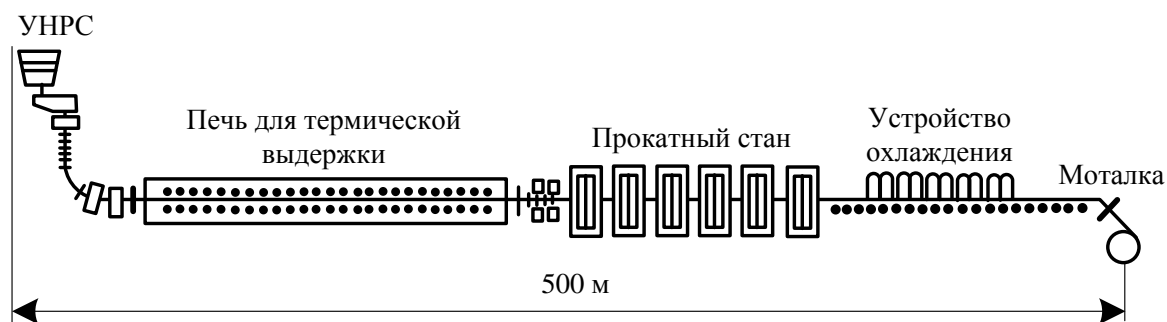


Рис. 4.15. Схема расположения оборудования литейно-прокатного агрегата CSP на заводе «Nucor»

Особенностью процесса CSP служит специальная форма кристаллизатора, называемого воронкообразным. Этот кристаллизатор имеет полость с воронкообразным расширением в центральной части, куда введен погружной разливочный стакан для подачи жидкой стали. В нижней части полость кристаллизатора имеет прямоугольное сечение и толщину 50 мм. Отливаемый слаб в кристаллизаторе деформируется с изменением поперечного профиля от выпуклого до прямоугольного. Эта новая технология позволила отливать слобы толщиной 50 мм. Скорость разливки 4 – 5 м/мин, что в два-три раза превышает показатель прежних слабовых машин. Длина опорной системы МНЛЗ, необходимая для затвердевания сляба, составляет всего 4 – 5 м.

Нагревательная печь. Благодаря высокой скорости разливки и малой длине МНЛЗ слаб на выходе имеет высокую температуру. Однако для выравнивания температур по объему сляба и для создания технологического буфера между МНЛЗ и прокатным станом необходима печь с функциями нагревательного колодца. Поскольку слаб может иметь максимальную длину 45 м, а его толщина равна 50 мм, используется туннельная печь, которую можно спроектировать достаточно большой длины для обеспечения непрерывного перемещения сляба.

Прокатный стан. Малая толщина сляба (50 мм) исключает необходимость в черновой прокатке, имеется возможность получать конечный продукт прокаткой только в чистовой группе клетей. Однако на входе в чистовую группу толщина сляба достаточно велика, поэтому прокатка в первых клетях идет со сверхнизкой скоростью и на такую скорость должен быть рассчитан температурный режим прокатки. Кроме того, во всех клетях до последней предусматривается прокатка с высоким обжатием. Все это требует применения специального материала

валков и других проектных решений, обеспечивающих прокатку на режимах, существенно отличных от традиционных.

Пуск первого агрегата CSP на заводе фирмы «Nucor Steel» в Крофордсвилле (США) в июле 1989 г. ознаменовал начало новой эры в производстве горячекатаной полосы. Тремя годами позже, в августе 1992 г., была начата эксплуатация второго агрегата CSP на заводе той же фирмы в Хикмене, предназначенного для производства 1 млн. т/год готового проката.

На заводе имеются две дуговые печи постоянного тока и два ковша-печи. Ниже приведены основные технические характеристики МНЛЗ и прокатного стана агрегата CSP завода в Хикмене:

МНЛЗ

Тип	Вертикальная с изгибом слитка
Число ручьев	2
Толщина сляба, мм	50
Ширина сляба, мм	1220 – 1625
Емкость ковша, т	28
Длина кристаллизатора, см	110
Скорость разливки, м/мин	2,5 – 6,0
Металлургическая длина, см	602
Радиус изгиба, см	300
Длина сляба, м	47
Длина нагревательной печи, м	206

Прокатный стан CSP

Прокатный стан	Шестиклетьевой
Толщина полосы, мм	1,8 – 12,7
Ширина полосы, мм	1220 – 1625
Относительная масса рулона, кг/мм 18	

Прокатный стан CSP обеспечивает общую вытяжку 33:1 от непрерывнолитого сляба до готовой полосы. На агрегате выпускают как ординарные, так и высокопрочные низколегированные стали.

Как уже отмечалось, основным элементом технологии CSP явля-

ется кристаллизатор, верхняя часть которого в целях обеспечения приема погружного стакана большого диаметра имеет воронкообразную форму; его форма прошла многочисленные испытания на водяной модели для определения оптимальной кривизны и положения погружного стакана.

Воронкообразная форма пропорциональна усадке корочки слитка, причем ее размеры таковы, что предупреждают образование мостиков между корочкой слитка и стаканом. Кривизна обеспечивает отсутствие напряжений в корочке при затвердевании металла во время вытягивания слитка. Разработанный кристаллизатор имеет значительные преимущества по сравнению с кристаллизаторами с параллельными гранями, применяемыми в других технологиях разлива слябов. Кристаллизатор изготавливают из медно-серебряного сплава без покрытия граней, срок службы составляет до 100 тыс.т. Это несколько меньше, чем в обычных установках, однако длительность фрикционного контакта примерно в пять раз больше, что обусловлено повышенной скоростью разлива 5 – 6 м/мин.

После ввода в эксплуатацию агрегата CSP на заводе в Крофордсвилле была оптимизирована первоначальная форма погружного стакана, срок службы которого достигает 18 плавов в серию.

При этом площадь поверхности мениска достаточно велика для расплавления порошкообразной шлакообразующей смеси, а зазор между стаканом и корочкой слитка достаточен для предупреждения образования мостиков (рис. 4.16). На заводе в Хикмене зазор между стаканом и медной стенкой кристаллизатора составляет 26 мм и при скорости разлива 5 м/мин прирост затвердевшей корочки в зоне наконечника стакана равен примерно 5 мм.

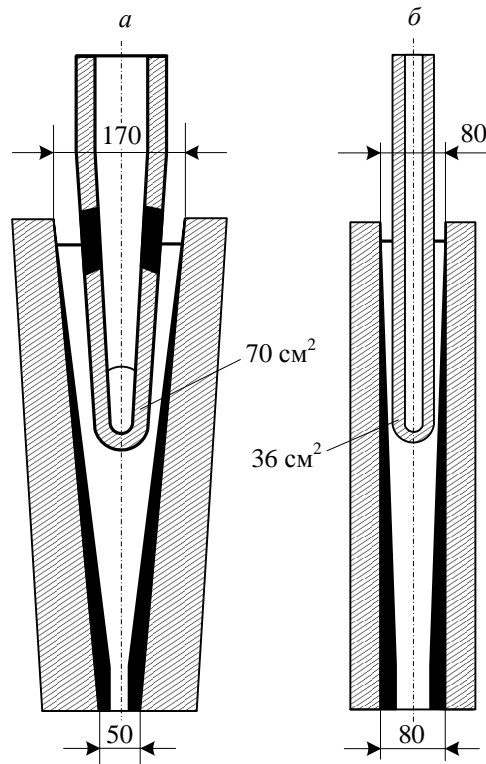


Рис. 4.16. Сопоставление зазора между стаканом и корочкой слитка в кристаллизаторах СВР (а) и с параллельными стенками (б)

Промежуточный ковш емкостью 28 т рассчитан на время пребывания металла 8 – 12 мин при разливке тонких слябов. Для точного регулирования положения стакана в кристаллизаторе промежуточный ковш опускают и поднимают с помощью двигателя и подъемного устройства со шпиндельным приводом.

Для обеспечения прохождения затравки без соприкосновения со стенками выходной конец кристаллизатора можно расширить с 50 почти до 200 мм. Для смены ширины и конусности сляба во время разливки регулируются узкие грани. Кристаллизатор работает в комплекте с четырехэксцентриковым устройством качания частотой 66 циклов в расчете на метр сляба. Величина амплитуды составляет +3 мм относительно уровня металла и контролируется радиоактивным методом, а частота качания при максимальной скорости разливки сокращает расход шлакообразующей смеси до менее 0,1 кг/м² поверхности слитка по сравнению с 0,3 кг/м² при обычной разливке.

В таблице 4.4 отмечены основные особенности процессов, данные о качестве продукции и производительности оборудования на мини-заводах.

Таблица 4.4

Основные особенности процессов

Поколение	1	1,5	2
Разработчик процесса	SMS	MDH	SMI
Металлургическая фирма	Nucor (США)	Arvedi (Италия)	Trico (США)
Эксплуатационные характеристики			
Автоматизация	Требуются опытные операторы	Требуются опытные операторы	Автоматизированное начало и окончание разливки
Технологическая гибкость	Узкий диапазон скоростей разливки	Узкий диапазон рабочих режимов. Отсутствие буферных зон между кристаллизатором, зоной обжата незатвердевшего слитка, обжимным станом в потоке (IRM), нагревательной печью (И)	Широкий диапазон скоростей разливки (2,0 – 5,0 м/мин), обеспечивающий гибкую связь между дуговой печью МНЛЗ и прокатным станом. Буферная зона В туннельной печи, допускающая 12-мин остановку прокатного стана
Быстрая смена погружного стакана	Невозможна	Нет	Есть
Обслуживание	Частые прорывы металла, сложная обработка кристаллизатора	Большая трудоемкость обслуживания ППУ «Сгетопавох», большой парк оборудования в производственной линии	Редкие прорывы металла, простая конструкция оборудования (на уровне обычного процесса)

Улучшенные технические характеристики агрегатов CSP и систем их автоматического регулирования позволили увеличить диапазон толщин отливаемой заготовки с 50 до 45 – 70 мм в зависимости от производительности и конечной толщины полосы; скорость разливки может достигать более 5,5 м/мин (расчетные параметры – примерно до 7

м/мин), толщина готовой полосы менее 1,0 мм.

Производство горячекатаных полос толщиной менее 1,5 мм, особенно полосы толщиной менее 1,0 мм, позволяет заменять холоднокатаную продукцию. Несмотря на то, что для многих областей применения холодная прокатка в отношении обеспечения высокого качества полосы, как и прежде, остается необходимой, растет доля продукции, которую можно заменить горячекатаной полосой. По прогнозам рост применения горячекатаной полосы составит около 6 % в год. Снижение издержек производства при этом находится в пределах от 20 до 40 долл./т.

Успешное внедрение в промышленность технологии CSP на основе использования тонких слябов послужило импульсом к производству сверхтонкой горячекатаной полосы. Фирма «Hylsa», Монтеррей (Мексика), производит на разработанной фирмой «Schloemann-Siemag» (Германия) специально для получения сверхтонких полос установке 30 % горячекатаных полос толщиной менее 1,5 мм и 10 % полос толщиной менее 1,0 мм.

Целью современных разработок является снижение конечной толщины полосы менее чем до 1,0 мм. Технологии прокатки в ферритной области со сниженными конечными температурами или бесконечной прокатки с более высокими скоростями на выходе позволяют, например, получать полосу толщиной до 0,8 мм. Безусловно, возможно и даже целесообразно сочетание обеих технологий.

Агрегат, введенный в эксплуатацию на заводе фирмы «Thyssen Krupp Stahl» в апреле 1999 г. предназначен преимущественно для производства горячекатаной полосы толщиной 1,0 – 6,35 мм (рис. 4.17).

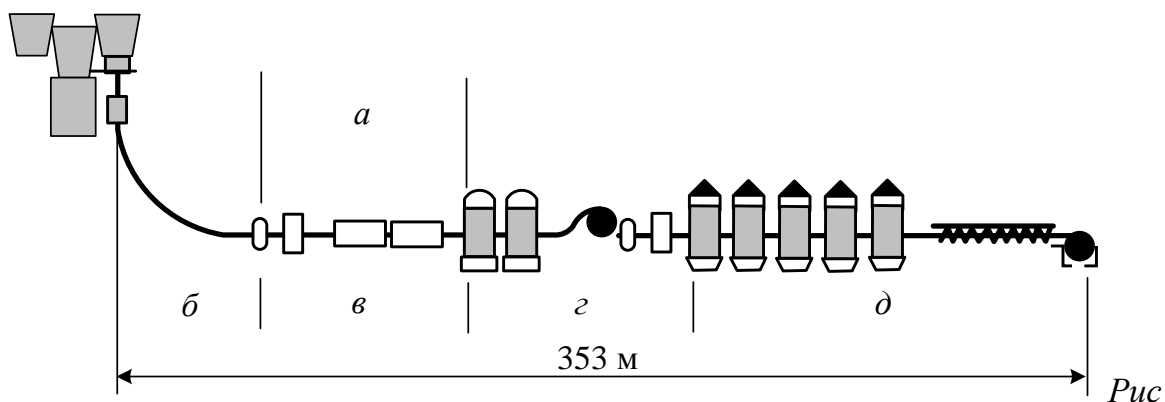


Рис. 4.17. Схема современной линии CSP, построенной для фирмы «Thyssen Krupp Stahl AG»: а – участок обжата заготовки с жидкой сердцевиной; б – МНЛЗ; в – печь, г – черновые клетки и моталка; д – чистовые клетки и моталка

По мере совершенствования оборудования и технологии CSP постоянно расширялся сортамент выпускаемой продукции. В таблице 4.5 приведены все перерабатываемые на CSP-агрегатах материалы в усло-

виях стандартно организованного производства.

Таблица 4.5

Марочный сортамент агрегатов CSP

Группа сталей	Примеры применения
Мягкие, нелегированные:	
для непосредственной холодной обработки давлением	Продольные балки
Конструкционные обычной прочности и высокопрочные:	Бандажная лента
универсальные	Трубы для возведения лесов
мелкозернистые для холодной деформации	Ободья для легковых автомобилей, детали конструкций для стеллажей
пригодные к сварке мелкозернистые	Рамные детали для легковых автомобилей, бандажная лента, емкости для пропана
стойкие к атмосферным воздействиям	Шпунтовые стенки
специальные (легированные фосфором)	Исходный продукт для холоднокатанных сталей
Для магистральных трубопроводов	Строительство трубопроводов
Термоулучшаемые:	
С-стали	Бандажная лента, уплотнительные кольца
С-Сг-стали	Соединяющие пластины
С-Mn-стали	Опорные трубы
С-Mn-V-стали	Возведение лесов, подмостков
С-Сг-Mo-стали	Тормозные элементы (авиастроение)
С-Сг-Mo-V-стали	Рулевая сошка
Пружинные:	
нелегированные	Пружины, работающие на изгиб, и спиральные пружины
легированные	Измерительные ленты
Инструментальные:	
нелегированные	Ножи, ножницы, плужный лемех, напильники, пилы
легированные	Полотно пилы
Износостойкие	Борона, культиватор

Магнитно-мягкие (Е-полоса):	Подкат для производства холоднокатаной полосы
нетекстурированные	Лист для электродвигателей
текстурированные	Генераторы, трансформаторы
Коррозионностойкие:	
ферритные	Кожух катализатора
аустенитные	В стадии опробования

Последним достижением в развитии процесса CSP является создание фирмами SMS, «Demag» и «Hilchenbach» (Германия) агрегата для отливки и прокатки на толщину 1 мм специальных сталей и поставки его фирме «Acciai Speciall» (Италия).

Процессы «полуторного поколения». В разработке процесса ISP (производство полосы в потоке) принимали участие следующие промышленные и научные организации: Mannesmann Demag Huttentechnik Research Center (Дуйсбург), Acciaeria Tubificio Arvedi S.p.A. (Кремона), Institut für Eisenhüttenkunde RWTH (Аахен).

Этот процесс реализован в январе 1992 г. на заводе фирмы «Finarvedi» в Кремоне. Сортамент агрегата – горячекатаная полоса толщиной 1,5 – 12 и шириной 1030 – 1250 мм в рулонах. Большую часть производственной программы агрегата составляют низко- и среднеуглеродистые стали. Кроме того, проведена опытная разливка высокоуглеродистой стали.

Схема ISP показана на рис. 4.18.

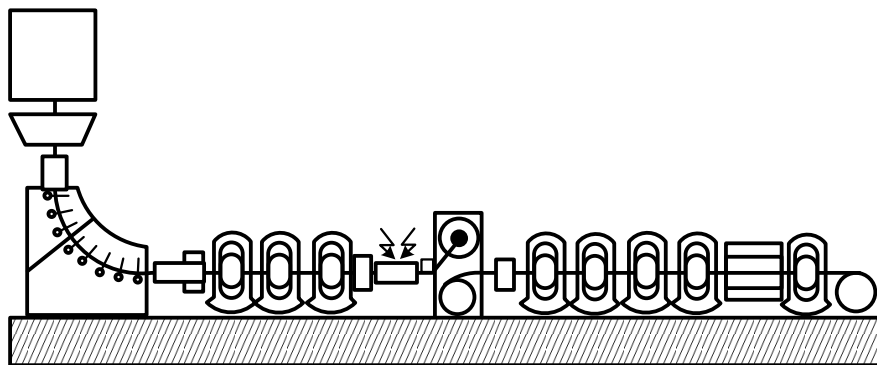


Рис. 4.18. Расположение основных производственных узлов на линии ISP (Arvedi)

Технологическая линия очень короткая: ее полная длина от МНЛЗ до подпольной моталки 180 м. На МНЛЗ сталь поступает в кристаллизатор через особоплоский погружной стакан, и сляб толщиной 60 мм уже

в кристаллизаторе деформируется, приобретая криволинейную форму. Непосредственно на выходе из кристаллизатора сляб с незатвердевшей сердцевиной подвергается обжатию до толщины 43 мм. После полного затвердевания сляба с использованием его теплосодержания осуществляется редуцирование до толщины 20 – 30 мм в обжимном стане, скорость прокатки на котором весьма низкая, поскольку скорость сляба на входе в стан равна скорости разливки (4,0 – 5,0 м/мин) и на стане раскат сильно охлаждается. Поэтому на следующей стадии процесса перед входом в чистовую группу стана расположено нагревательное устройство с индукционными нагревателями. Раскат, подогретый до температуры прокатки, выдерживается в промежуточном перемоточном устройстве с подогревом (печной моталке «Cremona Box»), ожидая подачи в чистовую группу из четырех клетей для прокатки полос толщиной 1,7 мм, используемых в производстве сварных труб.

Параметры процесса должны удерживаться в более узком диапазоне, чем на оборудовании первого поколения, поэтому для обслуживания агрегатов требуется персонал высокой квалификации. В производственной линии семь прокатных клетей. В трех клетях обжимного стана прокатка идет с низкими скоростями, что обуславливает низкую стойкость валков и большие тепловые потери из-за неблагоприятного теплового баланса. Таким образом, по эксплуатационным затратам процесс ISP менее выгоден, чем процесс первого поколения.

Но вместе с тем используемая технология разливки – прокатки обеспечивает получение стали с хорошими внутренним строением и с ограниченной сегрегацией примесей.

За счет использования теплосодержания стали и применения индукционного нагрева потребление энергии сокращается на 30 % по сравнению с обычным циклом МНЛЗ – полосовой стан горячей прокатки. По заводским оценкам экономия капиталовложений по сравнению с обычным циклом превышает 10 %.

В перспективе можно увеличить мощность завода вдвое, построив второй литейно-прокатный агрегат, поскольку стан горячей прокатки загружен не полностью.

Следующий этап развития технологии ISP – ее модификация – процесс TSCR производительностью до 1,4 млн. т листа в год при одноручьева МНЛЗ. Комплекс линии ISP– TSCR построен на заводе в Салдане (Южная Африка). Основные его отличия от линии в Кремоне: уменьшение числа клетей предварительного обжатия с трех до двух и перевод их из линии МНЛЗ на участок за нагревательной печью, замена индукционной нагревательной печи на газовую и печей с моталками типа «Cremona» на моталку coil-box.

Процесс FTSP разработан фирмой «Danieli» (Италия).

Фирма «Danieli» на заводе фирмы «Algoma Steel Inc.» (Канада) пустила комплекс, реализующий этот процесс по отливке тонких слябов и прокатке. Емкость сталеразливочных ковшей 230, промежуточного ковша 50 т. На двухручьевой МНЛЗ криволинейного типа отливают слябы шириной 800 – 1600 и толщиной 90 мм с мягким обжатием до 70 мм. Используется вертикальный кристаллизатор модели «Danieli H2» с расширительной воронкой для подачи металла. Расширительная воронкообразная часть сляба выправляется деформацией только в роликовой части под кристаллизатором (в отличие от кристаллизатора типа CSP фирмы SMS, в которой воронкообразная часть простирается на 2/3 кристаллизатора). Разработан специальный стакан для подачи металла в кристаллизатор, срок его службы в среднем 10, максимальный – 12 ч.

Полупромышленная МНЛЗ работает в Саболари, Италия, с 1992 г. Представители «Danieli» утверждают, что основные отличия данного процесса следующие:

- легкость, с которой толщина сляба может изменяться в интервале 45 – 55, а ширина – в интервале 1220 – 1620 мм;
- постоянное высокое качество поверхности;
- использование динамического регулирования уровня металла;
- высокое качество внутренних участков слабо обжатой продукции.

Процессы второго поколения (отливка слябов средней и промежуточной толщины). Три ведущие металлургические фирмы: LTV (США), «British Steel» и «Sumitomo Metal Industries» создали совместное предприятие для реализации проекта QSP (Quality Strip Production) – мини-завод «Trico Steel» в Декейтере (США) с долевым участием 50, 25 и 25 % соответственно. Сортамент и оптимальный объем продукции завода (2,2 млн. т/год) определены из потребностей регионального рынка юго-восточных штатов. При этом предусмотрели выпуск горячекатаной полосы толщиной до 1 мм.

Схема расположения оборудования на заводе «Trico Steel» представлена на рис. 4.19.

С целью повышения технологической гибкости на стадии выплавки стали две дуговые печи постоянного тока суммарной проектной мощностью 2,5 млн. т и две установки для внепечной обработки расположены на одной линии, а сталево́зы движутся по траекториям, перпендикулярным к направлению движения в общем транспортном пролете. Ковши могут перемещаться краном от дуговой печи на установку ковш-печь и на стенд МНЛЗ.

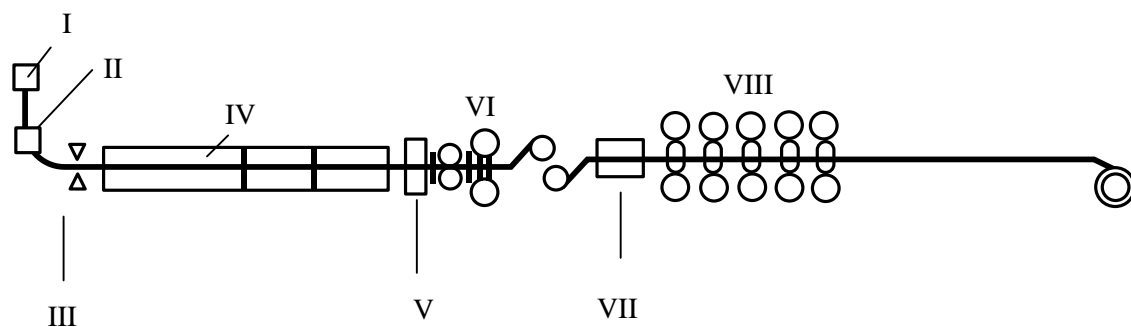


Рисунок 4.19. Схема расположения оборудования агрегата на заводе «Trico Steel»: I – две одноручьевые МНЛЗ; II – обжатие сляба с жидкой сердцевиной; III – ножницы для сляба; IV – туннельная печь; V – эджер; VI – однопроходный двухклетевой обжимной стан; VII – окалиноломатель; VIII – пятиклетевая чистовая группа

Таким образом, плавку из «северной» дуговой печи можно обработать в «южной» установке ковш-печь и разлить в «северной» МНЛЗ. Печной пролет спроектирован с учетом требования высокоэффективного транспортирования шихтовых материалов, которые более чем на 50 % состоят из заменителей лома. Губчатое железо и горячебрикетированный продукт восстановления загружаются по системе наклонных конвейеров, которые перемещают шихтовые материалы, а также легирующие из железнодорожных вагонов или грузовых автомобилей в накопительные бункера над дуговыми печами и установками для внепечной обработки. Это оборудование позволяет осуществить загрузку одной подачей и тем самым значительно сократить продолжительность плавки от выпуска до выпуска.

Длина стана горячей прокатки от последнего ролика центральной туннельной печи до второй моталки составляет около 195 м. Проектная мощность стана 2,5 млн. т/год.

К основным отличительным особенностям МНЛЗ относятся прямоугольный кристаллизатор для литья сляба толщиной до 100 мм и вихретоковый измеритель уровня металла с точностью $\pm 1,5$ мм. МНЛЗ оборудована одним кристаллизатором регулируемой ширины, которую можно изменять в пределах 914 – 1650 мм в процессе разливки. Кристаллизатор укомплектован системой электромагнитного торможения и устройством редуцирования до 70 мм сляба с жидкой сердцевиной в первой роликовой секции под участком изгиба. На МНЛЗ применяется водовоздушное охлаждение в комбинации с системой полудинамического управления форсунками.

Две МНЛЗ проектной мощностью 1,15 млн. т/год могут получать металл с одной из двух дуговых печей и двух установок ковш-печь.

Продолжительность разливки плавки 50 – 60 мин. Часовая производительность в расчете на одну машину составляет 169 т/ч.

Основные технические данные МНЛЗ:

Металлургическая длина, м	11,2
Длина вертикального участка, включая длину кристаллизатора, м	1,59
Радиус кривизны, м	3,5
Ширина сляба, мм	940-1650

Работа прокатного оборудования рассчитана на беспрограммную прокатку. Предусмотрена система слежения, которая позволяет отливать слябы разной ширины из сталей разных марок и получать горячекатаные полосы разной ширины и толщины из слябов чередующейся ширины.

Оборудование позволяет в любое время в процессе разливки включить или отключить обжатие слитка с жидкой сердцевиной, поэтому обжатию можно подвергать избирательно слябы для производства тонких или большой ширины полос из высокопрочной стали. В остальных случаях можно оставлять толщину сляба 90 – 100 мм и поддерживать высокую производительность МНЛЗ. В случае поломок оборудования или других нарушений процесса на последующих операциях можно значительно снизить скорость разливки, замедлить процесс и создать запас времени для устранения поломки или нарушения.

Горячекатаный рулон с черной поверхностью, полученный из сляба толщиной 90, шириной 1000 мм, отправили в США в один из центров для переработки рулонов и там оценили качество поверхности полосы. По качеству поверхности (coil surface rating) продукт оценен очень высоко и отнесен к интервалу категорий А-АА. Столь удовлетворительное качество обусловлено следующими факторами:

- стабильное положение мениска и слабое волнение на поверхности в кристаллизаторе, а также большая толщина отливаемого сляба (100 мм) обеспечили надлежащую смазку стенки кристаллизатора, уменьшили шлаковые включения и продольные трещины в слитке, позволили получать слябы с качеством, близким к качеству при традиционной технологии разливки;

- первичную окалину, образующуюся на поверхности сляба на МНЛЗ и в туннельной печи, удается эффективно удалять на окалиноломателе и в эджере в черновой группе стана, а благодаря малой толщине подката образование вторичной окалины незначительно. В итоге удается получать рулоны, слабо пораженные дефектами из-за окалины.

Сляб подвергается нагреву в туннельной печи и не имеет холодных участков. Кроме того, в составе оборудования предусмотрено промежуточное перемоточное устройство, обеспечивающее практически одинаковую температуру по длине подката, и все это позволяет прокатывать тонкие полосы высокой точностью размеров и формы.

В январе 1996 г. вышел на проектную годовую мощность 1,5 млн. т металлургический завод фирмы «Steel Dynamic» в Батлере (США), на котором реализована технология второго поколения CSP (Compact Steel Production) – разработка фирмы «Schloeman-Siemag» (ФРГ).

На заводе в Батлере введена в эксплуатацию первая в США двухкорпусная дуговая сталеплавильная печь переменного тока емкостью каждого корпуса по 135 т. Одна из технических особенностей завода – использование «гибкой» МНЛЗ типа CSP. Этот агрегат, разработанный совместно тремя фирмами: «Schloeman-Siemag», «Thyssen» и «Usinor-Sacilor», впервые в мире реализует технологию CPR (Casting-Pressing-Rolling). Технология CPR предусматривает мягкое обжатие валками полужатвердевшей заготовки непосредственно под кристаллизатором и получение тонкого сляба толщиной менее 35 мм, что позволяет уменьшить число клетей стана горячей прокатки и создать весьма компактное производство.

На «гибкой» МНЛЗ за счет обжатия сляба (максимальная толщина 80 мм) можно увеличить толщину кристаллизатора на величину обжатия. Иначе говоря, сечение кристаллизатора приближается к характерному для классических слябовых МНЛЗ. Благодаря большим размерам сечения верхней части кристаллизатора уменьшаются эрозия стенок, захват шлакообразующей смеси в металл сляба, склонность к образованию поверхностных трещин и другие отрицательные явления. Создаются более благоприятные условия для всплывания неметаллических включений, т.е. для повышения чистоты стали. Таким образом, можно рассчитывать на значительное улучшение качества поверхности продукта.

Прокатку тонких слябов ведут на шестиклетевом стане горячей прокатки горячекатаных полос толщиной от одного до 15 мм при ширине от 990 до 1626 мм. Число клетей стана будет увеличено до семи из-за необходимости получения полосы малых толщин (1 мм) и прокатки коррозионно-стойких сталей. Предполагают, что заводу может потребоваться еще одна дуговая печь. В двухкорпусной печи можно выплавлять ежегодно 1,6 – 1,7 млн. т стали при наличии губчатого железа в качестве металлошихты.

Фирмы «North Star Steel» (США) и «Broken Hill Proprietary-BHP» (Австралия) создали совместное предприятие с долевым участием по 50

% для проектирования, строительства и эксплуатации мини-завода производительностью 1,5 млн. т горячекатаной стальной полосы в год, построенного в Дельте (США) в 1997 г.

На мини-заводе эксплуатируют вновь разработанную электродуговую печь переменного тока емкостью 180 т с двумя корпусами и двойной шахтой (производительность печи 270 т/ч при использовании шихты только из лома), установку ковш-печь, МНЛЗ для отливки слябов толщиной 90 мм, туннельную печь и стан горячей прокатки с двумя черновыми клетями, обогреваемым промежуточным рольгангом и шестью чистовыми клетями.

На одноручьевой МНЛЗ длиной 15,7 м, включая вертикальный кристаллизатор длиной 950 мм, верхнюю часть зоны вторичного охлаждения и 11 роликовых секций фирмы «Sumitomo Heavy Industries» (Япония), разливают низкоуглеродистую сталь со скоростью до 5 м/мин. Радиус кривизны составляет 3,5 мм. На МНЛЗ можно оперативно изменять ширину кристаллизатора и получать слябы шириной от 900 до 1565 мм, применяются гидравлическое устройство качания кристаллизатора и электромагнитное торможение стали в кристаллизаторе.

Шестиклетевая чистовая группа стана оснащена системой автоматического регулирования толщины и ширины полосы с помощью гидравлических устройств, устройствами осевого перемещения рабочих валков и их противоизгиба, гидравлическими петледержателями и устройствами для автоматической замены валков, толщиномерами, устройствами для измерения профиля, ширины и плоскостности полосы. Толщина готовой полосы составляет 1,4 – 9,5, ширина – 900 – 1500 мм.

В сентябре 1993 г. американская фирма-поставщик прокатного оборудования «Tippins» объявила о совместной с фирмой «Samsung Heavy» разработке новой технологии для черной металлургии, названной процессом TSP. Разработанный агрегат отличается низкими капитальными затратами и предназначен для производства листа и полосы на мини-заводах.

Общая концепция агрегата TSP – это совмещение МНЛЗ для слябов средних толщин (от 100 до 125 мм) с одноклетевым станом Стенкеля при проектной производительности от 400 тыс. до 1,1 млн. т/год горячекатаной полосы. С учетом изменений конструкции производительность может быть увеличена до 8 млн. т/год. Этот процесс может использоваться для выпуска готовой полосы толщиной 1,5 – 12 мм из углеродистых, коррозионно-стойких, высокопрочных низколегированных и трубных сталей, а также сталей для вытяжки. Такая гибкость сортамента делает агрегат приспособленным для работы на заводах невысокой производительности, нацеленных на удовлетворение нужд местного

рынка. На агрегате также можно с достаточной эффективностью производить толстый лист в мерных длинах и рулонах при широком сортаменте по ширине и толщине, а также по категориям качества. Уже одна эта особенность процесса TSP привлекает к нему внимание мини-заводов в развивающихся странах, у которых имеется потребность в получении продукции мирового класса широкого марочного сортамента для нужд местного рынка.

Процесс TSP был разработан с учетом широкого выбора возможных технических решений в соответствии с характеристиками успешно работающего мини-завода.

В агрегате TSP применяется одноручьевая слябовая МНЛЗ малой высоты конструкции фирмы «Samsung Heavy» для разлива в слябы толщиной 100 – 125 мм 80–130-т плавков примерно за 45 – 60 мин. Для достижения высокой производительности на установке может быть предусмотрена разливка в два ручья. Типовая МНЛЗ отличается следующими конструктивными особенностями:

- прямым кристаллизатором традиционной конструкции. Ширина и конусность регулируются в процессе разлива;
- регулируемым качанием частотой до 300 Гц, синусоидальным или несинусоидальным.

Толщина до 125 мм позволяет исключить из схемы производства обжимной стан, но достаточна для обеспечения хорошего качества поверхности. Более того, МНЛЗ для слябов промежуточных толщин может быть запроектирована на получение слябов шириной более 2500 мм, что значительно превышает ограничения по ширине для слябов меньших толщин. В МНЛЗ для слябов толщиной 125 мм используется кристаллизатор традиционной конструкции, что исключает применение специальных металлоприемников усложненной конструкции.

Для выравнивания температуры поверхности и сердцевины сляб помещают в нагревательную печь. За 12,5 мин температура сляба выравнивается и достигает 1250 °С. Из-за короткой продолжительности нагрева окалинообразование в печи сведено к минимуму.

В агрегате TSP предусмотрено использование печи с шагающими подом или балками в зависимости от заданной толщины и длины слябов. При типовой длине печи 10 м ее вместимость составит примерно 200 – 300 т, что достаточно для синхронизации скоростей работы МНЛЗ и прокатного стана.

Выравнивающая печь сконструирована так, чтобы выполнять двойную функцию: горячего и холодного посада. При этом работа на холодном посаде слябов отличается пониженной производительностью. В то же время это позволяет в случае необходимости обеспечить зачи-

стку слябов определенного сортамента и обеспечивает продолжение работы МНЛЗ или прокатного стана во время простоя любого из этих участков.

Центральным узлом агрегата TSP является современный одноклетевой прокатный стан Стеккеля. На этом стане в реверсивных проходах выполняют как черновую, так и чистовую прокатку. Сразу же после обжатия полосы до толщины примерно 20 – 25 мм ее сматывают на печных моталках, расположенных по обе стороны прокатной клетки с целью сохранения температуры полосы. Затем осуществляют реверс полосы. В общей сложности обычно требуются три черновых и шесть чистовых проходов с использованием печных моталок для обжатия сляба толщиной 125 мм на минимальную готовую толщину 1,5 мм.

Традиционно главным недостатком стана Стеккеля считалось плохое качество поверхности из-за образования окалины. Увеличение скорости прокатки, быстрый реверс, применение усовершенствованных систем сбива окалины и контролируемой прокатки существенно повысили качество поверхности полосы.

Технологический процесс Continuous Thin Slab Casting and Rolling (CONROLL), разработанный фирмами «Voest-Alpine Industrieangelagenbau» и «Avesta Sheffield AB», основывался на получении заготовки со значительно большей (75 – 150 мм) толщиной, чем в процессах CSP и ISP. Промышленное опробование процесса проведено на металлургическом заводе в Линце (Австрия) и на заводе «Avesta Sheffield AB» (Швеция). Основные технологические параметры узлов линии CONROLL (рис. 4.20): МНЛЗ криволинейного типа ($R = 3 - 5$ м), кристаллизатор плоский с прямыми параллельными стенками, максимальная ширина заготовок 2100 мм; «мягкое обжатие» в клетке SGC (Stand Gauge CONROLL – постоянный контроль зазора); скорость отливки 1,5 – 4 м/мин; продукция – горячекатаный лист сечением (1,8 – 12)×(800 – 1600; 2100) мм в рулонах массой 18 – 21 кг/мм, производительность – 1 млн. т/год.

Процесс типа CONROLL внедрен в производство в середине 1990-х годов на заводе фирмы ARMCO в Мэнсфилде (США).

Таким образом, производственный процесс на мини-заводе имеет интегрированный характер со взаимосвязанными и непрерывно протекающими операциями на плавильном, разливочном и прокатном оборудовании. Здесь соединены высокопроизводительный стан горячей прокатки (обычно 2 – 4 млн. т/год) и МНЛЗ с относительно низкой производительностью (обычно 0,8 – 1,2 млн. т), причем даже две параллельно действующие МНЛЗ не достигают производительности прокатного стана. Для обеспечения максимального годового объема производства на

мини-заводе стремятся предельно сократить простои МНЛЗ, введя серийную разливку с большим числом плавов в серии (увеличение коэффициента серийности).

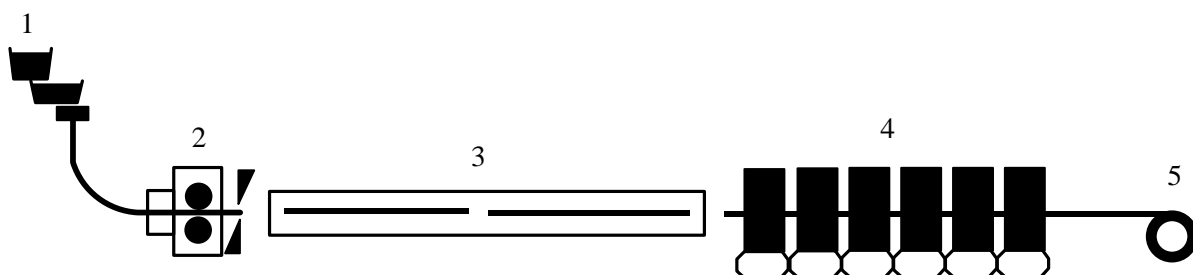


Рис. 4.20. Схема линии CONROLL с группой отделочных клеток кварто:
 1 – МНЛЗ; 2 – клетка мягкого обжата; 3 – туннельная проходная печь;
 4 – отделочные клетки; 5 – моталка

Специфическим элементом огнеупорного припаса МНЛЗ для литья слябов малой и средней толщины является погружной стакан между промежуточным ковшом и кристаллизатором. Полость кристаллизатора имеет малый размер по толщине (50 – 150 мм), а скорость разливки при установленном режиме высокая (4 – 5 м/мин), поэтому массовая скорость поступления стали в кристаллизатор 2 – 5 м/мин, т.е. находится на том же уровне, что и у обычных слябовых МНЛЗ. Если погружной стакан вводят в воронкообразное расширение в верхней части кристаллизатора, то можно обеспечить необходимую толщину стенки стакана. Его стойкость не представляет особой проблемы, но проявляется сильная склонность к волновому движению на поверхности ванны в кристаллизаторе, которое стремятся уменьшить за счет специального профиля выходных отверстий стакана. В кристаллизаторе для слябов средней толщины стабилизируют мениск применением электромагнитного тормоза, а проблему стойкости стакана решают с помощью быстрой смены (NQC) и другими мерами. Во всех случаях для предотвращения зарастания стакана сталь обрабатывают кальцием.

На тонко- и среднеслябовой МНЛЗ, действующей на мини-заводе, продолжительность разливки составляет около 1 ч. Но при литье сляба средней толщины стойкость погружного стакана составляет около 5 ч, следовательно, коэффициент серийности, определяемый стаканом, не превосходит 4 – 5 плавов. Если бы удалось организовать быструю смену стакана в процессе разливки, это позволило бы повысить серийность в два-три раза. Существует схема быстрой смены погружного стакана при скорости разливки до 3 м/мин.

Подогретый новый стакан с помощью манипулятора вводится в кристаллизатор и устанавливается в кассету рядом с изношенным стаканом, а затем гидроцилиндр проталкивает новый стакан в рабочую позицию.

Сравнение по разным показателям тонко- и среднеслябовых МНЛЗ (производительность, качество металла, капитальные и эксплуатационные затраты и т.д.) позволяет сделать один определенный вывод, что тип МНЛЗ должен выбираться из конкретных условий ее сооружения, эксплуатации и планируемой продукции.

Но, тем не менее, принципиально, что среднеслябовые МНЛЗ по производительности и сортаменту продукции составляют реальную конкуренцию тонкослябовым МНЛЗ. Если в начальный период развития технологии отливки тонких слябов (1988 – 1989 гг.) такие фирмы, как «Daniellb», «Voest-Alpine» и «Krupp» считали оптимальной толщину слябов в интервале 70 – 80 мм, хотя на первом этапе выдвинулись тонкослябовые (50 – 60 мм и менее) МНЛЗ фирм SMS и MD. Очевидно, что в настоящее время актуален сдвиг в сторону увеличения сечений слябов (75 – 150 мм), которые условно можно отнести к «средним» слябам.

Многочисленные технико-экономические исследования установили, 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). Это наряду с показателями качества металла позволяет говорить о высокой конкурентоспособности среднеслябовой МНЛЗ.

В производстве горячекатаной листовой стали после строительства мини-завода фирмы «Nucor» в США по всей Северной Америке получили развитие мини-заводы с производством листовой продукции на основе литья тонких и средних по толщине слябов. На начальном этапе мини-заводы по производству листовой продукции ориентировались на рынок проката относительно низкого качества, но в настоящее время они способны выходить на рынок продукции среднего качества. В дальнейшем рано или поздно по мере развития экономики в странах Юго-Восточной Азии, Индии, государствах Ближнего Востока, вероятно, также получат распространение мини-заводы с производством листового проката. В промышленно развитых странах Европы и Северной Америки рационализация и структурная перестройка металлургических заводов также вполне могут в ряде случаев привести к обновлению оборудования для разлива и горячей прокатки при сохранении схемы с доменным производством. Однако в Японии, где металлургические заводы с полным циклом расположены вблизи основных потребителей горяче- и холоднокатаной листовой стали, перспективы развития мини-

заводов можно оценить как довольно скромные. Таким образом, в целом процессы компактного производства листов и полос, вероятно, будут развиваться во всем мире. При этом металлургическим производством выдвигаются два требования: разработка технологических процессов для производства продукции высокого качества и создание компактного дешевого оборудования. На удовлетворение этих требований будут, вероятно, направлены усилия фирм-разработчиков во всем мире.

Ко второму виду (разливка без кристаллизатора) относятся установки валкового, ленточного или конвейерного типа. На установках данного типа кристаллизующийся металл движется вместе с кристаллизатором и скольжение оболочки слитка (заготовки) относительно кристаллизатора отсутствует. Начало инженерных изысканий в этом направлении положил еще Г. Бессемер, предложивший 130 лет назад установку (рис. 4.21) непосредственного получения стальной ленты (штрипса) толщиной 2,5 мм при разливке металла между двумя вращающимися водоохлаждаемыми цилиндрами диаметром 1220 мм каждый (так называемая *бесслитковая прокатка*). Практические трудности реализации процессов такого типа оказались в то время труднопреодолимыми. Однако в последнее время процесс непрерывной разливки тонких слябов получил широкое распространение: разработаны различные варианты конструкций подвода металла к валкам (водоохлаждаемым цилиндрам).

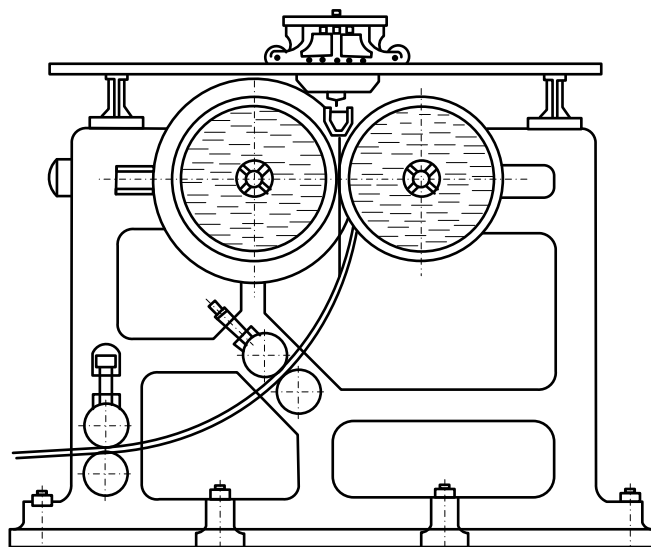


Рис. 4.21. Установка непрерывной разливки («бесслитковой прокатки») конструкции Г. Бессемера

4.9. Установки непрерывной отливки полосы

За последние 15 лет в мире (Японии, Корее, США, Австралии, Австрии, Канаде, Китае, Франции и Германии) было создано 45 промышленных, полупромышленных и опытных установок, большая часть из которых к настоящему времени демонтирована, результаты проведенных работ освещены более чем в 150 публикациях. Опробовались и отработывались разные схемы процесса и способы подачи металла на поверхности, обеспечивающие его быструю кристаллизацию.

В подавляющем большинстве случаев это были роликовые машины той или иной конструкции (рис. 4.22), и только единичные машины предусматривали подачу металла на движущуюся полосу.

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.

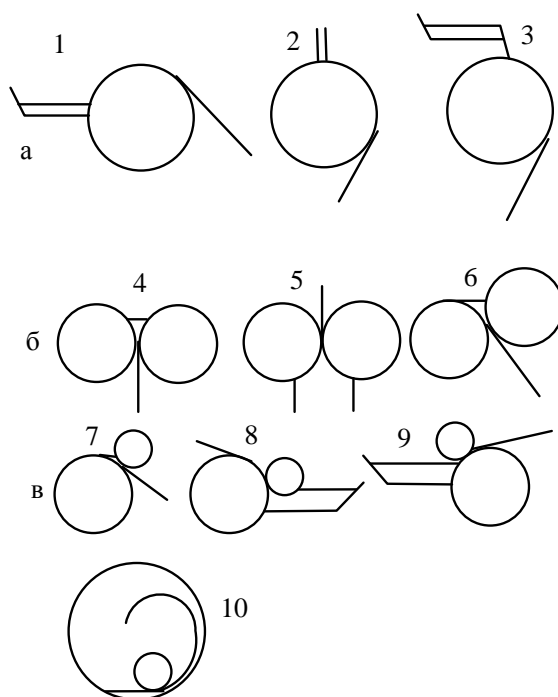


Рис. 4.22. Принципиальные схемы валковых установок непрерывной отливки полосы: а – одновалковые с переливом (1), вытягиванием (2) и подачей по желобу жидкого металла (3); б – с двумя валками одинакового диаметра и подачей металла сверху (4), снизу вверх (5), по диагонали (6); в – с двумя валками разного диаметра, их тангенциальным расположением и внешней (7 – 9) или внутренней (10) подачей металла

Значительно уменьшился выброс парниковых газов: выделение CO_2 – на 160 кг/т, или на 85 %, по сравнению с использованием для обогрева печей природного газа; выделение NO_x – на 207 г/т, или на 90 %; выделение SO_2 – на 36 г/т, или на 70 %. В связи с этим Европейская комиссия приняла решение об оказании проекту Eurostrip финансовой поддержки.

В то же время некоторые специалисты считают, что максимальная экономия на 1 т проката при производстве углеродистых сталей не превысит 25 долл., так как стоимость горячей прокатки составляет 20 – 25 долл. Для нержавеющей сталей экономия может быть значительно больше: 50 – 150 долл. на тонну. Однако здесь не учитываются капиталовложения, что для развивающихся стран может оказаться очень важным.

Однако переход от обычной непрерывной разливки к отливке листа значительно сложнее, чем к отливке тонких слябов, так как возникает ряд серьезных проблем.

Из всех валковых машин в настоящее время находятся в эксплуатации только двухвалковые машины (рис. 4.23). В этих установках кристаллизатор состоит из двух валков (рис. 4.24), расположенных непосредственно под промежуточным ковшем и вращающихся в противоположных направлениях. Жидкая сталь 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, толщина которого определяется расстоянием между валками, а ширина – боковыми стенками кристаллизатора.

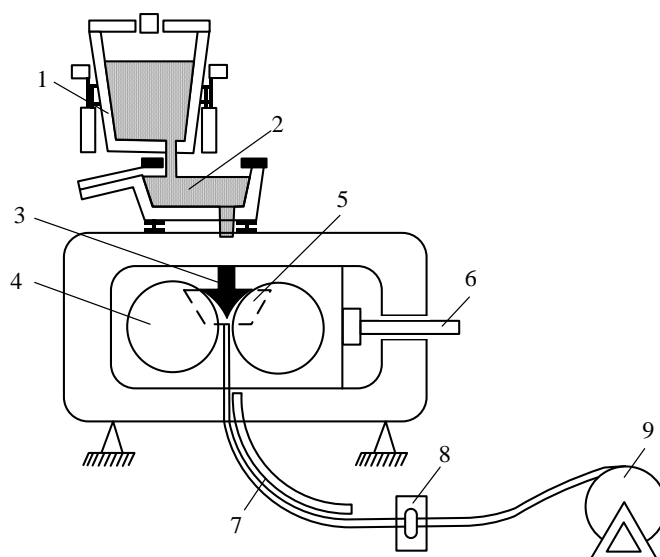


Рис. 4.23. Схема двухвалковой МНЛЗ: 1 – ковш; 2 – разливочный узел; 3 – погружной стакан; 4 – валки; 5 – уплотнение; 6 – регулятор нагрузки; 7 – направляющий желоб; 8 – приемные валки; 9 – статыватель

Очень важная проблема – отвод тепла из зоны кристаллизации, скорость потока которого составляет $10^2 - 10^4$ град./с. Вначале валки изготавливали из стали, затем из меди, сейчас наиболее широко используют сплав меди с хромом, в некоторых случаях с покрытием поверхности валка никелем, что обеспечивает высокую теплопроводность и достаточную механическую прочность инструмента. Для отвода выделяющегося тепла валки охлаждают водой.

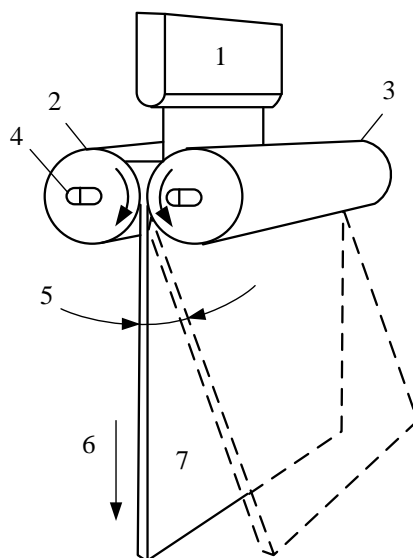


Рис. 4.24. Схема кристаллизатора двухвалковой установки для отливки полосы: 1 – щелевое разливочное устройство; 2 – первый валок; 3 – второй валок; 4 – удельное давление металла на валки; 5 – угол отклонения полосы; 6 – направление разливки; 7 – быстро затвердевшая полоса

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. Разработчики из итальянской фирмы AST применили композиционный состав, в котором часть стенки, соприкасающаяся с жидкой сталью, изготовлена из малотеплопроводного материала, а участок стенки, прилегающий к валкам, – из материала с высокой ударной стойкостью и малосмачиваемого жидкой сталью. В Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины (прежнее название Институт проблем литья), а также в Японии проводятся исследования по удержанию ванны жидкой стали с помощью электромагнитного поля. Исследователи из американской фирмы «Inland Steel» использовали этот метод для удержания стальной ванны глу-

биной 140 мм на модели с невращающимися валками.

Конструкция боковой плиты и система ее поддержки, разработанные фирмой ILVA, приведены на рисунке 4.25. В принципе возможно несколько вариантов установки боковых удерживающих пластин (рис. 4.26).

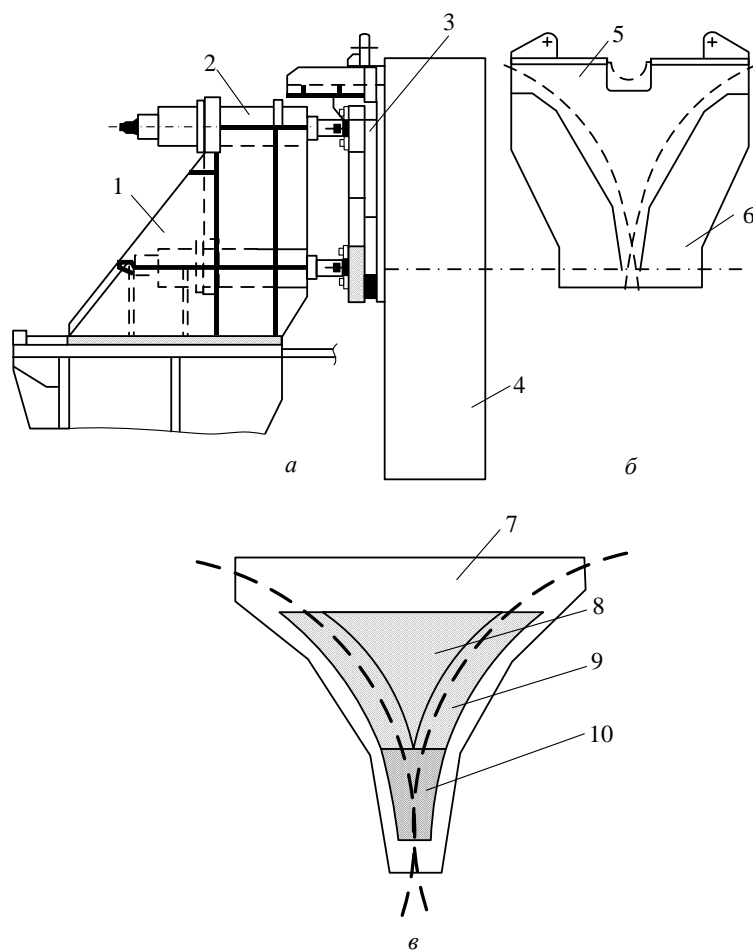


Рис. 4.25. Герметизация разливки с помощью боковой плиты (предложение фирм ILVA/CSN) – боковой (а) и фронтальный (б, в) виды герметизирующей плиты и системы ее поддержки: 1 – корпус; 2 – распорные пружины; 3 – боковая плита; 4 – валок; 5 – огнеупор; 6 – основа; 7 – уровень расплава; 8 – центральная зона ванны жидкой стали; 9 – зона контакта с валками; 10 – зона прокатки

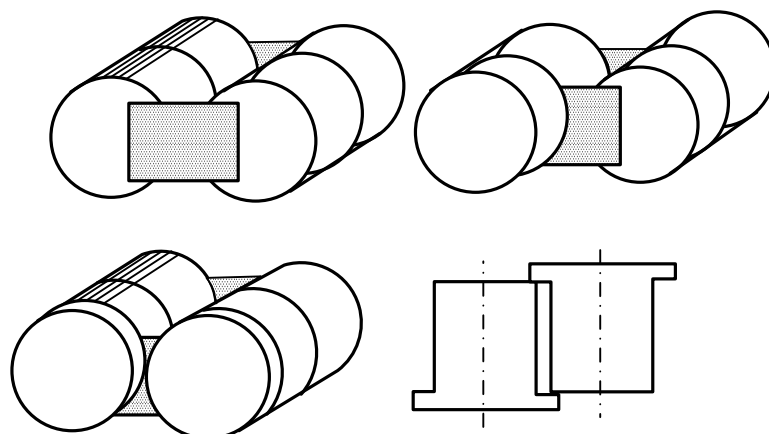


Рис. 4.26. Возможные варианты геометрии бокового уплотнения зоны литья двухвалковой установки

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. При отливке сляба первый миллиметр по толщине в дальнейшем, как правило, удаляется как окисленный слой, тогда как при отливке тонкого листа трещина глубиной 1 мм может оказаться сквозной. Поэтому при отливке листа решающими становятся первые миллисекунды контакта жидкой стали с поверхностью валка, так как теплоотвод при этом значительно сильнее, чем при отливке слябов, из-за отсутствия шлаковой прослойки между валком и листом.

Для предотвращения образования трещин и обеспечения постоянства толщины листа необходимо поддерживать постоянным уровень стали в кристаллизаторе с точностью ± 2 мм и не допускать волнения поверхности расплава. Разными фирмами разрабатываются специальные системы подачи жидкой стали в межвалковое пространство с помощью плоского сопла, обеспечивающие равномерное распределение металла по ширине кристаллизатора при постоянной температуре и небольшой скорости поступления металла в зазор между валками. В большинстве случаев используются погружные стаканы.

До промышленной реализации доведен ряд проектов. Один из наиболее масштабных и в наибольшей степени отработанных – Eurostrip.

В Европе несколько лет назад немецкая фирма «Кгирп Thyssen Stainless» (KTS), итальянская фирма «Acciai Speciall Terni» (AST) и австрийская фирма «Voest Alpine Industrieanlagenbau» (VAI) создали объ-

единение для разработки и внедрения установки и технологии отливки тонкого листа на двухвалковой машине. В фирме AST была создана опытная установка, и на ней отработывалась новая технология, а на заводе «Krupp Thyssen Nirosta» в Крефельде (Германия) была построена установка с годовой производительностью 100 тыс. т с увеличением до 400 тыс. т на втором этапе. Введение ее в промышленную эксплуатацию было намечено на конец ноября 1999 г. В то же время после нескольких лет лабораторных исследовательских работ Irsid (Франция), университет Аахена (Германия), Usinor (Франция) и Thyssen Stahl (Германия) в 1991 г. решили совместно продолжить работу по созданию промышленной двухроликковой установки для прямой отливки стальной полосы. Работа получила название проект «Myosotis».

Промышленный прототип созданной установки размещен в электросталеплавильном цехе завода в Избергусе (Франция), оборудованном двумя 92-т дуговыми печами, установками аргоно- и вакуумкислородного обезуглероживания, классической слябовой МНЛЗ. Установку «Myosotis» (рис. 4.27) разместили в открьлке разливочного пролета так, что ковш со сталью после аргонокислородного обезуглероживания может одним краном подаваться как на слябовую, так и на двухроликковую МНЛЗ.

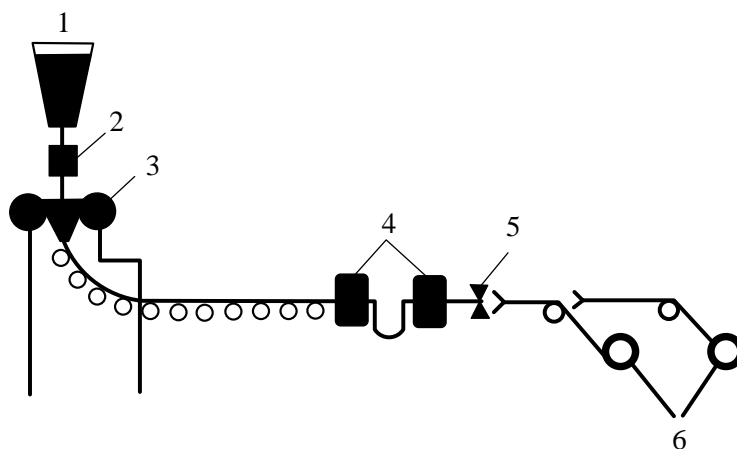


Рис. 4.27. Схема двухроликковой установки «Myosotis»: 1 и 2 – стелеразливочный и промежуточный ковши; 3 – ролик; 4 – тянущие ролик; 5 – дисковые ножницы продольной резки полосы; 6 – моталки

Емкость стелеразливочного ковша 92 т, промежуточного – 12 т. Ролик-кристаллизаторы (диаметр 1500, длина 865 мм) выполнены из меди с электролитическим никелевым покрытием. Делительные ножницы и две моталки дают возможность работать непрерывно. Это позволило в октябре 1995 г. разлить 92-т плавку коррозионно-стойкой стали

на полосу толщиной 2,7 мм. В июне 1996 г. разлили 92-т плавку электротехнической стали, в феврале 1997 г. – 92-т плавку низкоуглеродистой стали. С 1997 г. начали получать стальную полосу коррозионно-стойкой стали, качество которой отвечало требованиям потребителей. К июню 1999 г. разлили более 20 тыс. т стали, 80 % которой составляет сталь типа AISI 304 (18-8), остальное – электротехническая (2 % Si) и низкоуглеродистая стали. Лучшие результаты работы установки (максимальные показатели) приведены ниже:

Сталь	AISI 304	Электротехническая	Низкоуглеродистая
Длина полосы, м	10700 (окт.1995г.)	4745 (сент.1996г.)	4480 (февр.1997 г.)
Масса разлитой стали, т	227	70 (ковш опорожнен) 1,15(сент.1996г.)	70 (ковш опорожнен) 1,07 (февр.1997 г.)
Продолжительность разливки, ч	2,5 – 4,5	2,1 – 3,0	2,3 – 2,8

Продолжительность непрерывной разливки зависит главным образом от срока службы прижимных боковых плит-уплотнителей (ограничителей жидкой ванны). Последние изготавливают из несмачиваемых сталью композитных материалов. Износ использованных на установке плит составлял 0,5 и 1,3 мм/км полосы при отливке соответственно тонкой (2,8 мм) и толстой (4,2 мм) полос. Максимальный срок службы соответственно 100 и 129 мин (при разливке 92-т плавки).

Расчетная стойкость никелевого покрытия роликов отвечает разливке 3 – 7 тыс. т стали в зависимости от толщины отливаемой полосы. На практике срок службы превысил 3500 т. За все время работы установки поломок роликов не было; без их ремонта было разлито 22 плавки. Конструкция роликов влияет на геометрию полосы. Для холодной прокатки необходима выпуклая заданных размеров полоса; 90 % литой полосы толщиной 3 мм отвечают условиям последующей холодной прокатки. В случае отливки более толстой полосы возникают затруднения при последующих операциях. К настоящему времени доля качественных рулонов достигла 85 %.

Основными поверхностными дефектами литой полосы являются трещины и оксидные пятна. Анализ более 400 10-т рулонов показал, что при отливке тонкой полосы появление трещин можно избежать. На 2 тыс. т литых полос, использованных для производства декоративных

труб, рекламаций не поступало. В структуре литой полосы представлены однородные столбчатые дендриты и центральные равноосные кристаллы, характеризующие надежность процесса. Незначительная центральная пористость устраняется при соответствующей горячей прокатке. Механические свойства литой стальной полосы близки к механическим свойствам обычной горячекатаной полосы. После отжига, травления, холодной прокатки и окончательного отжига механические свойства сравнимы с механическими свойствами обычной холоднокатаной стальной полосы.

В сентябре 1999 г. все эти фирмы создали общеевропейское объединение Eurostrip, в котором работают две промышленные установки: в Крефельде – для разработки промышленной технологии разлива нержавеющей стали и оценки экономической эффективности процесса, в Терни – для отработки узлов установки и деталей технологии для последующего использования на заводе в Крефельде, а также для разработки технологии разлива углеродистых сталей.

В декабре 1999 г. на заводе в Крефельде была разлита первая промышленная плавка массой 36 т с получением листа шириной 1100 и толщиной 3 мм. С марта 2000 г. устойчиво разливается полный ковш вместимостью 90 т. Жидкая сталь поступает через промежуточный ковш на разливочную машину. Лист с помощью вытягивающих роликов передается на моталку. По окончании разлива рулон разматывается и разделяется на рулоны меньшей массы. Поверхность листа не имела дефектов. В продольном направлении лист по форме соответствовал требованиям к горячекатаному листу, а в поперечном направлении – холоднокатаному. Кромки отличались очень высоким качеством.

Листы обжимали до толщины 0,8 мм на стане холодной прокатки, отжигали и оценивали по действующим стандартам. Поверхностные дефекты отсутствовали. Благодаря быстрой кристаллизации чистота листа была выше, чем обычно. В результате этого возросла коррозионная стойкость. Механические свойства соответствовали требованиям к обычному листу, однако относительное удлинение находилось на нижнем пределе. В дальнейшем предполагается проведение работ по стабилизации процесса разлива и оптимизации технологии обработки листа с целью улучшения механических свойств. Намечена установка быстро сменяемых боковых стенок, а также непрерывной методической печи, клетки горячего обжатия и сдвоенной моталки с целью совместить прокатку с разливкой и проводить разливку методом плавки на плавку.

Основные характеристики установки для отливки тонких листов из аустенитных нержавеющей сталей на заводе «Krupp Thyssen Nirosta» в Крефельде:

Диаметр валка, мм	1500
Скорость разливки, м/мин	60 – 100 (макс.
150)	
Толщина листа, мм	1,5 – 4,5
Ширина листа, мм	1100 – 1450 мм
Емкость разливочного ковша, т	90
Емкость промежуточного ковша, т	18
Совмещение с прокаткой	предусмотрено
Производительность установки, тыс.т/год	400

В Японии разрабатывается проект фирм «Nippon Steel» и «Mitsubishi Heavy Industries». В январе 1996 г. фирма «Nippon Steel» сообщила о своих планах ввести в действие в ноябре 1997 г. на заводе в Хикари установку для отливки тонкого листа нержавеющей стали производительностью 35 тыс. т в год. Разработку и поставку оборудования взяла на себя фирма «Mitsubishi Heavy Industries». Установка изготовлена, и на ней начаты работы, которые находятся пока на стадии испытаний. Сообщается, что фирма достигла больших успехов по сравнению с другими японскими фирмами. На опытной установке на заводе в Хикари получают полосу шириной 1330 мм из коррозионностойкой стали типа 304. Считают, что это самая широкая в мире полоса из стали 304, полученная таким способом. Сталь разливают из ковша емкостью 10 т в покрытые никелем медные ролики диаметром 1200 мм. Фирма «Nippon Steeb» уже продает продукцию опытной установки в Японии, и покупатели приняли эту сталь как эквивалентную обычной стали 304. Руководители проекта не разглашают подробных данных о состоянии работ; по имеющимся сведениям производство листа не превышает нескольких сотен тонн в месяц, что далеко от намеченных нескольких тысяч тонн.

4.10. Проект SMS Demag MAIN AG/MTAG

В конце 2000 г. было опубликовано сообщение, что германская фирма «SMS Demag AG» и швейцарская фирма «MAIN AG/Marti-Technologie AG» подписали в августе 2000 г. лицензионное соглашение о строительстве промышленной двухвалковой установки «Caststrip Switzerland» по отливке тонкого листа из углеродистых и нержавеющей сталей производительностью 300 – 800 тыс. т жидкой стали в год. Конструкция установки разрабатывалась в течение последних пяти лет фирмой MAIN AG/MTAG.

Установка оборудована системой привода, обеспечивающей бы-

струю замену валков, а также оригинальным устройством боковых стенок кристаллизатора, позволяющим изменять ширину отливаемого листа. Отличительной особенностью является совершенно новое решение валков разливочной машины, что позволяет быстро менять приводную систему и валки. На установке будут выпускать полосу толщиной 1,5 – 4 и шириной 1600 мм.

Оборудование оснащено новаторской системой манипулирования движением полосы при сохранении непрерывности производственного цикла. Обработка стали в инертном газе от разливки до прокатки обеспечивает высокое качество продукции. Для облегчения движения стали между валками применяется специальный раствор, который также способствует созданию ровного уровня и оптимального потока металла для равномерного затвердевания. Фирма «SMS Demag» является владельцем «ноу-хау» компоновки завода, включающей в единый поток контролируемую прокатку, охлаждение, термическую обработку, зачистку, травление (если необходимо), холодную прокатку и окончательную обработку.

Три проекта реализованы в промышленности. Проводится ряд научно-исследовательских и опытно-промышленных работ в области прямой отливки тонкого листа.

В Южной Корее фирма POSCO совместно с фирмой DDL/POSEC разработала и изготовила установку для отливки листов толщиной 2 – 6 и шириной 1300 с валками диаметром 1250 мм. Емкость ковша – 120 т. На установке проводятся опытные разливы.

В Японии фирма «Pacific Metals» смонтировала установку, изготовленную фирмой «Hitachi Zosen», с диаметром валков 1200 мм для отливки листа толщиной 2 – 5 и шириной 1050 мм. Емкость ковша 10 т. В настоящее время отрабатывается конструкция боковых ограничителей. Фирма «Sumitomo Metals» собственными силами изготовила установку с диаметром валков 1400 для отливки листа толщиной 1,5 – 3,0 и шириной 720 мм. Масса плавки 15 т. В настоящее время установка законсервирована.

Во Франции на фирме «Irsid» создана установка, изготовленная фирмой «Clecim», с диаметром валков 660 для отливки полосы толщиной 1 – 4 и шириной 200 мм. Емкость ковша 6 т. На установке проводятся опытные работы.

В Англии фирмой «British Steel» смонтирована установка, изготовленная фирмой «Steel Engineering», с валками диаметром 750 мм для отливки листа толщиной 2 – 5 и шириной до 400 мм. Масса плавки 3 т. На установке проводятся опытные работы.

В Германии изготовлены две установки для исследовательских

работ: в университете Аахена для отливки 1–2-мм полос шириной 150 мм, масса плавки 180 кг, диаметр валков 580 мм; в институте М. Планка для отливки 1-5-мм полосы шириной 120 мм, масса плавки 70 кг, диаметр валков 330 мм.

В Канаде фирмой «IMI/Bessemer» изготовлена собственными силами установка с диаметром валков 600 для отливки полосы шириной 200 и толщиной 2 – 5 мм. Масса плавки 1 т. На установке закончены пусконаладочные работы и начата разработка технологии отливки углеродистых сталей.

МНЛЗ для прямой отливки полосы, эксплуатируемые в мире, указаны в таблице 4.6.

Вариант такого рода установок – МНЛЗ конвейерного или «гусеничного» типа. Одной из первых установок конвейерного типа была установка инженера М.Ф. Голдобина (рис. 4.28), спроектированная в 1946 г. и построенная в 1950 г.

На установках ленточного типа металл из ковша через металлоприемник непрерывно поступает в пространство между бесконечной лентой и колесом. Внутренняя поверхность ленты и внешний обод колеса представляют собой кристаллизатор, в котором непрерывно заливаемая сталь должна успеть закристаллизоваться. Установки такого типа используют для получения профилей небольшого сечения (например, проволоки или тонкой ленты). На рисунке 4.29 показана схема установки для непосредственного получения тонких слябов толщиной от 20 до 80 мм, шириной 600 мм из углеродистых и коррозионностойких сталей в конвертерном цехе одного из заводов Японии.

Таблица 4.5

Характеристика валковых МНЛЗ, эксплуатируемых в мире

Фирма, страна	Поставщик оборудования	Толщина полосы, мм	Ширина полосы, мм	Диаметр роликов-кристаллизаторов, мм	Емкость ковша, т
Промышленные установки					
NSC (Япония)	Mitsubishi	2-5	1330	1200	60
AST (Темі, Италия)	LnnseNAI Clecim	2-5	860	1500	65
Usinor (Франция)		2-4	865	1500	92
Промышленные испытания					
POSCO (Ю. Корея)	DDL/Posec	2-6	1300	1250	10

Рacific Metals (Япония)	Hitachi	2,5-5	1050	1200	1
-------------------------	---------	-------	------	------	---

Окончание таблицы 4.5

Фирма, страна	Поставщик оборудования	Толщина полосы, мм	Ширина полосы, мм	Диаметр роликов-кристаллизаторов, мм	Емкость ковша, т
Sumitomo (Япония)	Zosen	1,5-3	720	1400	15
Пилотные установки					
Irsid (Франция)	Clecim	1-4	200	660	6
British Steel (Великобритания)	British Steel Eng.	2-5	400	750	3
Mefos (Швеция)	MDH	5-10	900	**	10
TU Clausthal (Германия)	*	5-10	300	**	1,0
Aachen Univ. (Германия)	*	1-2	150	580	0,18
Max Planck (Германия)	*	1-5	120	330	0,07
IMI (Канада)	*	2-5	200	600	1,0
*Собственного производства.					
** Конвейерная.					

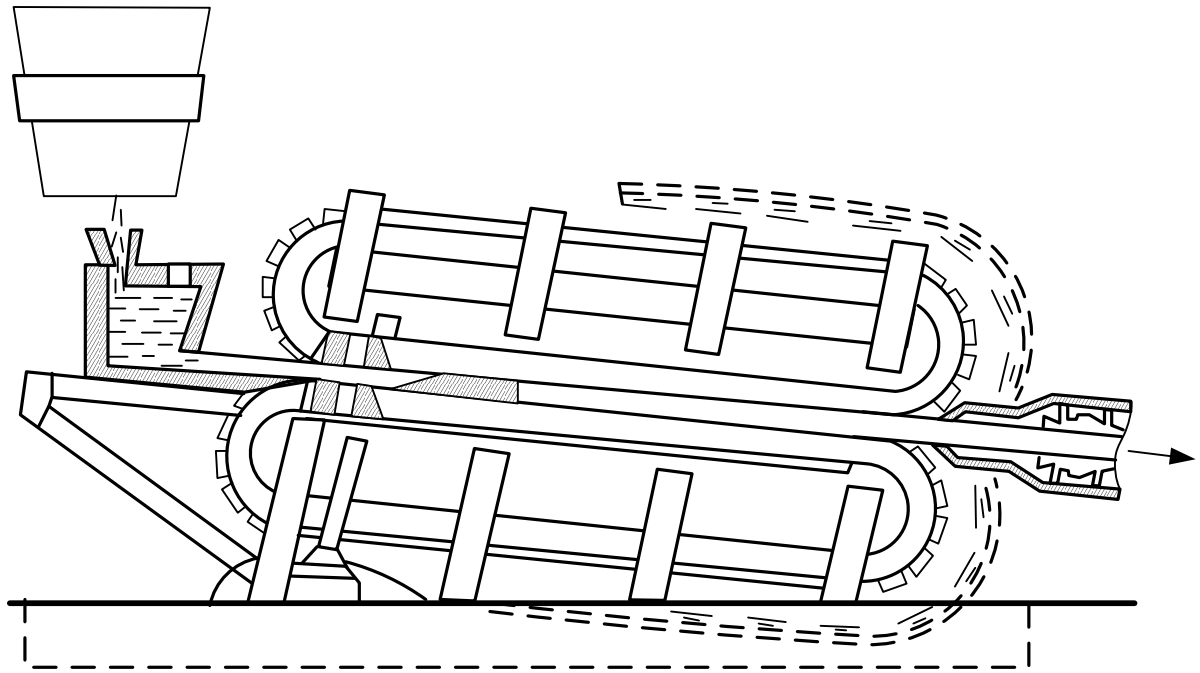


Рис. 4.28. Схема разливочной машины инженера М.Ф. Голдобина

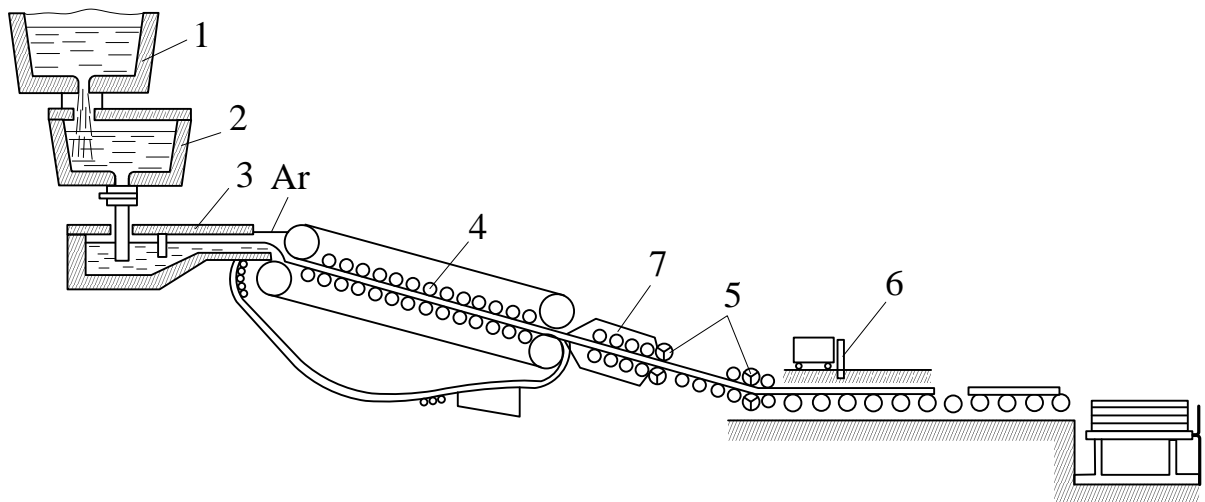


Рис. 4.29. МНЛЗ ленточного типа системы Hazelett (завод Kashima, Япония):
 1 – сталеразливочный ковш; 2 – промежуточный ковш; 3 – металлоприемник;
 4 – направляющие ролики; 5 – тянущие ролики; 6 – кислородная резка; 7 – зона вторичного охлаждения

Металл получают в 250-т конвертере, затем из 250-т ковша пере­ливают в 50-т ковш, из которого последовательно за­глубленной струей он попадает в большой (8 т) и малый (2 т) промежуточные ков­ши, затем поступает на двухленточную МНЛЗ (струю металла защищают от окис-

ления аргоном). Металл затвердевает в зазоре между двумя бесконечными водоохлаждаемыми лентами. Скорость выхода получаемого листа составляет 4 – 6 м/мин (максимальная – 15 м/мин). По имени разработчика Р.В. Хазелетта схема известна как Hazelett-схема (или Hazelett/Krupp). Установка действует с 1983 г. Первый опыт эксплуатации установок такого типа (рис. 4.30) показал, что для их успешной работы необходимо иметь металл стандартно высокого качества, высокий уровень организации контроля и автоматизации.

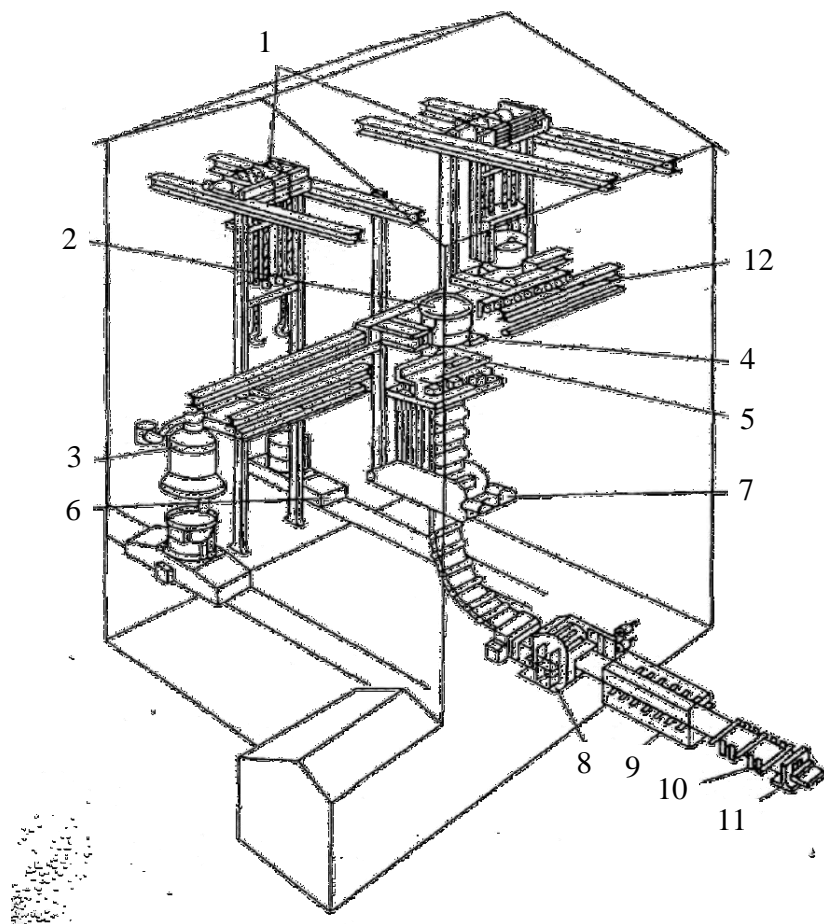


Рис.4.30. Схема МНЛЗ, совмещённой с прокаткой: 1 – подъемник сталеразливочного ковша; 2 – сталеразливочный ковш; 3 – одна из двух установок вакуумирования; 4 – промежуточный ковш а тележке; 5 – кристаллизатор; 6 – тележка для транспортирования сталеразливочного ковша; 7 – тянущие валки; 8 – правильная машина; 9 – подогревательная печь; 10 – обжимной стан; 11 – газорезка; 12 – разливочная тележка

Группой фирм (Mannesmann Demag, Salzgitter AG, Thyssen Krupp Stahl AG) разработан процесс DSC (Direct Strip Casting). На пилотной установке MEFOS, Лулео (Швеция) отливают лист шириной 900 мм без последующей деформации. На пилотной установке в техническом уни-

верситете в Клаустале (ФРГ) отливают лист шириной 300 мм с последующей непрерывной прокаткой в лист толщиной 1 – 6 мм, который затем сматывается в рулон. Процесс DSC заключается в горизонтальной разливке на ленточно-конвейерной части длиной 10 м. Толщина литого листа 10 – 50 мм.

Этот процесс разрабатывают фирмы MEFOS и «TU Claustahl» с целью обеспечить поставку более толстой полосы (толщиной 8 – 5 мм). Применяют поточную прокатку в валках диаметром 300 мм с целью обеспечить рекристаллизацию литой полосы и корректировку размеров полосы перед холодной прокаткой. Произвели полосу шириной 900 мм с хорошим качеством поверхности, обеспечено хорошее регулирование толщины. В настоящее время в ходе исследований основное внимание уделяют обеспечению нужных механических свойств полосы и достижению в ней более равномерного распределения неметаллических включений, концентрирующихся ближе к верхней поверхности полосы.

Основные данные установок ленточной отливки полосы из низкоуглеродистых сталей:

Фирма-разработчик	Клаусталь I	Клаусталь II	MEFOS
Длина охлажденной полосы, мм	1500	3200	3800
Ширина полосы, мм	300	500	1050
Толщина полосы, мм	10-15	10-15	10-12
Скорость отливки, см/с	8	18	20
Емкость печи, кг	120	1300	4000
Прокатка в потоке	Нет	Есть	Нет

Схема установки «Клаусталь II» приведена на рисунке 4.31.

Таким образом, очевидно, что литье тонких полос имеет перспективы промышленной реализации для производства листовой коррозионно-стойкой или кремнистой стали с ее использованием по назначениям, где не предъявляются высокие требования к качеству поверхности, внутренней структуры и механическим свойствам металла. Что касается углеродистых сталей, то к ним всегда предъявляют определенные требования в отношении качества поверхности и механических свойств, необходимой предпосылкой является также возможность массового производства, поэтому технология литья этих сталей еще нуждается в доработке.

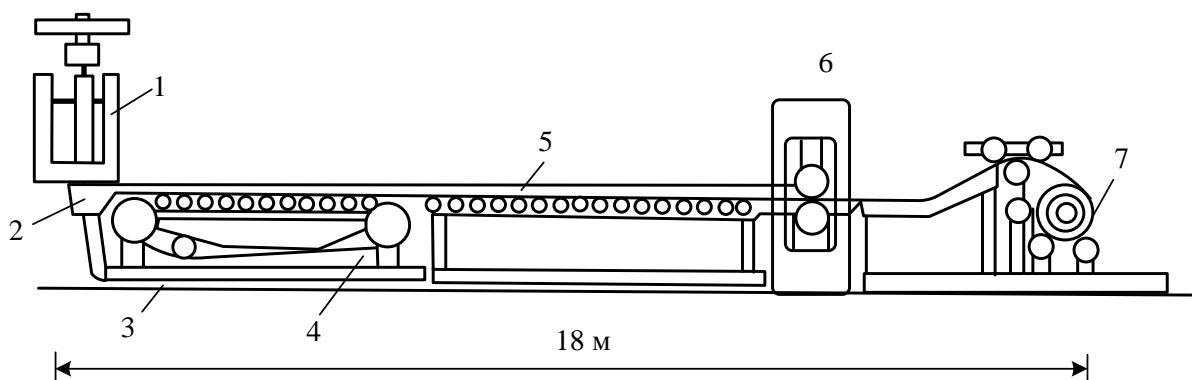


Рис. 4.31. Схема установки «Клаусталь II» для отливки полосы: 1 – печь; 2 – разливочное устройство; 3 – натяжной ролик; 4 – водяная камера; 5 – холодильник; 6 – прокатная клетка; 7 – моталка

Преодолеть этот барьер и создать первую действительно промышленную установку широкого профиля поставила перед собой в качестве ближайшей задачи с выпуском промышленных партий листа фирма «Nucor» (процесс Castrip).

История разработки технологического процесса Castrip сводится к следующему. Австралийская фирма «BHP Steel» и японская фирма ИИ (Ishirawa-Narima Heavy Industries) приступили к совместной разработке установки для непрерывной отливки полосы в 1988 г. На австралийском заводе в Порт Кембл была построена опытная установка, на которой можно было отливать полосу шириной до 600 мм и сматывать ее в рулон массой 5 т. Первые результаты экспериментов на этой установке при отливке полосы из коррозионно-стойкой стали марки 304 были многообещающими. К 1990 г. была произведена полоса торгового качества из этой стали. Затем провели эксперименты по отливке полосы из углеродистых сталей, результаты которых показали, что это более трудная задача. Однако удалось произвести полосу из углеродистой стали толщиной 2 и шириной 1345 мм в 5-т рулонах. Эту полосу протравили, подвергли холодной прокатке, цинкованию и изготовили из нее гнутые профили, а также после холодной прокатки до толщины 0,42 мм из листа были изготовлены трубы диаметром 21,3 – 88,9 и сечением 25×25 и 50×50 мм. Вследствие большой скорости кристаллизации сегрегация не наблюдалась, что обеспечивает высокую чистоту стали по неметаллическим включениям. Ее прочность составляет не менее 550 МПа. Продукция была продана потребителям, но их оценка фирмой не разглашается.

Таким образом, получили первое представление о возможности отливки полосы из углеродистой стали.

В августе 1993 г. совет директоров фирмы «BHP Steel», рассмот-

рев данные об успешных результатах экспериментов на опытной установке, утвердил строительство крупной «демонстрационной установки», на которой можно было бы показать техническую жизнеспособность технологии непрерывной отливки полосы из коррозионно-стойких сталей, введенную в эксплуатацию в феврале 1995 г. Эта установка была «полноразмерной», на ней можно было разливать сталь из ковшей емкостью 60 т, полоса максимальной шириной 1345 и толщиной 2,5 мм сматывалась в рулоны максимальной массой 25 т.

Демонстрационная установка работала до конца 1999 г., и на ней были разработаны основы технологии отливки конкурентоспособных на рынке полос из углеродистых сталей. На этом возможности демонстрационной установки были исчерпаны. Для дальнейшего совершенствования технологии надо было создавать оборудование, способное функционировать в реальных производственных условиях с обеспечением серийной разливки. Хотя техническая возможность реализации разработанной технологии была показана, все же надо было доказать также возможность стабильной промышленной разливки стали по этой технологии.

Фирма «Nucor Corp.» – признанный лидер в практическом применении новой технологии непрерывной отливки тонких слябов – искала новую передовую технологию, которая могла бы оказать такое же большое влияние на будущую рентабельность фирмы, как и промышленное применение технологии непрерывной отливки тонких слябов в 1990-е годы. Проведенный фирмой «Nucor Corp.» анализ показал, что технология, разработанная фирмами ВНР и ИИ, была единственной из имеющихся технологий непрерывной разливки полосы из углеродистых сталей, которые реально могли быть реализованы в имеющихся условиях.

Контакты фирм ВНР, ИИ и «Nucor» привели к образованию фирмы «Castrip LLC» (Шарлотта, Северная Каролина) с ограниченной ответственностью, на которой «Nucor» принадлежит 47,5, фирме ВНР – 45, ИИ – 5 % акций. Задача «Castrip LLC» заключается в создании технологии и защите ее патентами процесса Castrip. «Nucor» является первым лицензиатом Castrip LLC и в настоящее время строит первую в мире действительно промышленную установку для отливки полосы в Крофордсвилле (шт. Индиана), намереваясь при этом решить следующие задачи:

– разработать основные принципы быстрого затвердевания стали, принимая во внимание, что скорости передачи тепла от стали к медным валкам более чем в 30 раз превышают любые скорости при отливке толстых или тонких слябов;

– разработать датчики, которые позволяли бы измерить соответствующие переменные параметры в тяжелых условиях, причем с точностью, никогда ранее не достигавшейся;

– необходимо для высокоточного регулирования переменных параметров разливки подобрать высокоскоростные процессоры;

– разработать новые материалы для валков, устройств для дозирования металла и боковых порогов;

– сконструировать роботы для использования на разных этапах процесса, поскольку оборудование установки является настолько компактным и быстродействующим, что вмешательство человека невозможно.

Фирмы ВНВ, ИИ совместно затратят 500 млн. долл. на создание и совершенствование процесса непрерывной отливки полосы. «Castrip LLC» уже накопила портфель из более 1500 патентов и подала заявки на патенты, по существу, в каждой стране мира. Схема установки «Castrip» приведена на рисунке 4.32.

При строительстве установки «Castrip» на заводе фирмы «Nucor» повторно использованы многие детали демонстрационной установки. Общие расходы по этому проекту превышают 100 млн. долл. США. Расплавленная сталь будет поступать из существующего плавильного цеха в ковше на самоходной платформе. Все электрическое оборудование будет новым.

Данные об установке «Castrip» фирмы «Nucor» в Крофордсвилле приведены ниже:

Масса плавки и емкость ковша, т	110
Тип МНЛЗ	С двумя валками диаметром 500 мм
Скорость разливки, м/мин	80, 159 (max)
Толщина полосы, мм	0,7-2,0
Ширина полосы, мм	≤ 2000
Масса рулона, т	25
Стан в потоке прокатки	4-валковая клеть с гидросистемой для регулирования толщины
Размеры рабочих валков, мм	475×2050
Размеры опорных валков, мм	1550×2050
Усилие прокатки, МН	≤ 30
Мощность главного привода, кВт	3500
Холодильник	С 10 верхними и нижними коллекторами
Массы моталок, т	2×40
Диаметр барабана моталки, мм	760

Производительность, тыс. т/год 500

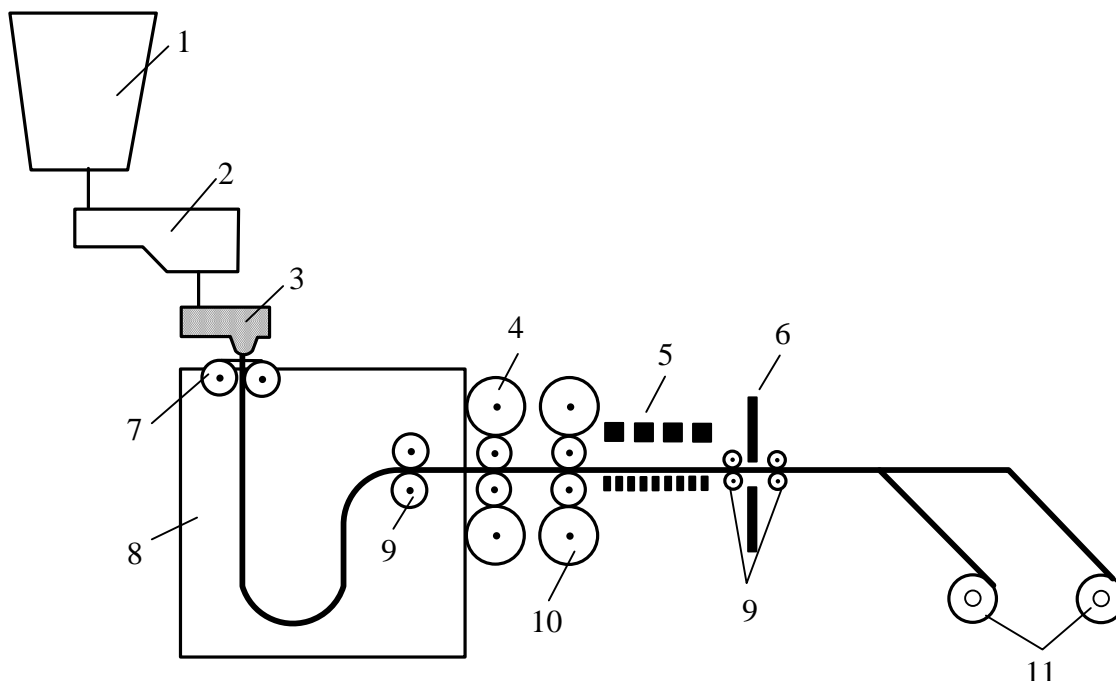


Рис. 4.32. Схема установки «Castrip» на заводе фирмы «Niscor» в Крофордсвилле: 1 и 2 – сталеразливочный и промежуточный ковши; 3 – переходное устройство и разливочный стакан, подводящий сталь к валкам; 4 – клеть для горячей прокатки; 5 – холодильник; 6 – ножницы; 7 – валки для отливки полосы; 8 – резервуар с регулируемой атмосферой; 9 – тянущие валки; 10 – вторая клеть для горячей прокатки (возможная); 11 – подпольные моталки

Длина всей установки, начиная от сталеразливочного ковша и кончая подпольными моталками, менее 70 м. Ожидают, что установка будет введена в эксплуатацию в ближайшее время.

Производительность установки изменяется в широких пределах (от 300 до 750 тыс. т/год) в зависимости от толщины и ширины полосы (рис.4.33). В отличие от других металлургических установок производительность (т/час) установки «Castrip» тем больше, чем тоньше полоса (рис.4.33, а). На первом этапе предполагается производить полосу толщиной – 1,6 со средней шириной -1345 мм. При этом производительность установки будет 500 тыс. т готовой продукции первого сорта в год. Большая часть этой полосы будет равной по качеству протравленной и холоднокатаной полосе.

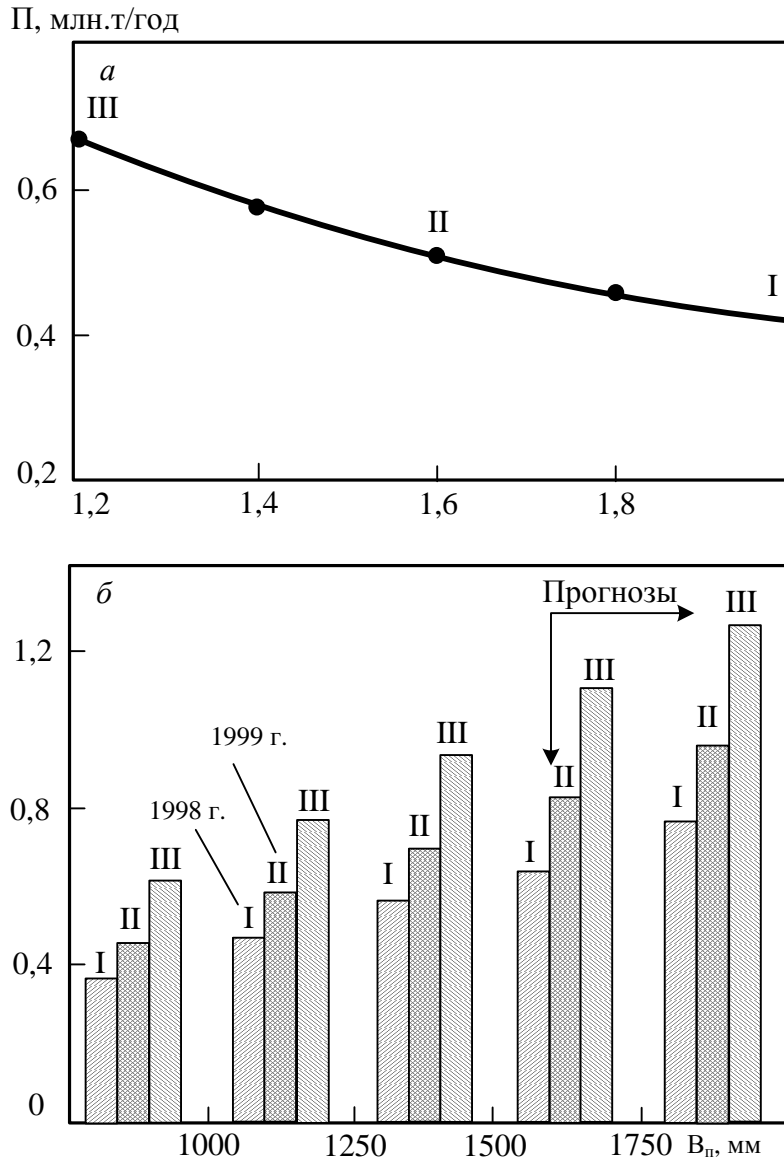


Рис.4.33. Годовая производительность установки «Castrip» в зависимости от толщины (а) и ширины (б) получаемой полосы

Однако ожидают, что с накоплением производственного опыта среднюю толщину полосы будут уменьшать до 1 мм и менее, при этом ширина полосы увеличится до 500 мм и более, причем производительность увеличится примерно на 50 %.

Установка «Castrip» на заводе в Крофордсвилле имеет ряд особенностей:

- не является исследовательским или полупромышленным агрегатом для испытаний. Все детали установки выполнены с учетом обеспечения стабильного производства. Замена валков будет занимать менее 10 мин. Ожидают, что срок службы керамических боковых порогов по-

зволит разливать серийно, по меньшей мере, три плавки из сталеразливочных ковшей емкостью 110 т;

– уникальна в том отношении, что на ней можно будет разливать и углеродистые, и коррозионно-стойкие стали (серии 400). На основании накопленного опыта полагают, что коррозионно-стойкие стали будут разливаться значительно легче, чем углеродистые;

– обеспечит производство и обычной, и тонкой горячекатаной полосы, заменяющей холоднокатаную, из низкоуглеродистой стали, причем будет уменьшена или вообще устранена потребность в травлении и холодной прокатке. Первоначально предполагалось производить толстую горячекатаную полосу в рулонах, но опыт, накопленный при эксплуатации демонстрационной установки, показал, что можно добиться большего. Производство толстой полосы не позволяет полностью использовать преимущества, предоставляемые уникальными возможностями процесса прямой отливки полосы. По существу, экономически нецелесообразно производить толстую (более 2 мм) полосу в рулонах и затем подвергать ее холодной прокатке, поскольку полосу толщиной менее либо равной 1 мм можно производить прямо на установке «Castrip». Сверхтонкую (ULTRA-TNIN – это фабричная марка фирмы «Castrip LLC») полосу в рулонах, полученную на установке «Castrip», уже цинковали, не проводя никакой холодной прокатки, и оцинкованная полоса достаточно высоко оценена потребителями.

Кроме того, во-первых, опыт фирм ВНР, ИИ убедительно показал, что при большом диаметре (≥ 1000 мм) валков установки увеличиваются расходы, причем возрастают и капитальные затраты и издержки производства. На установке «Castrip» фирмы «Nucor» будут использовать валки диаметром 500 мм. При использовании таких небольших валков обеспечивается дополнительное важное преимущество, которое заключается в том, что можно применять маленькие относительно недорогие пороги, удерживающие расплавленную сталь на торцах валков.

Во-вторых, на установке предполагается производить продукцию, которая будет промежуточной по внешнему виду и характеристикам поверхности между обычной горячекатаной полосой в рулонах и холоднокатаной полосой. По-видимому, можно обеспечить специальные физические свойства стали, не изменяя ее химического состава. При этом значительно повышается гибкость производителя стали в поставке металла разного качества (рис. 4.34).

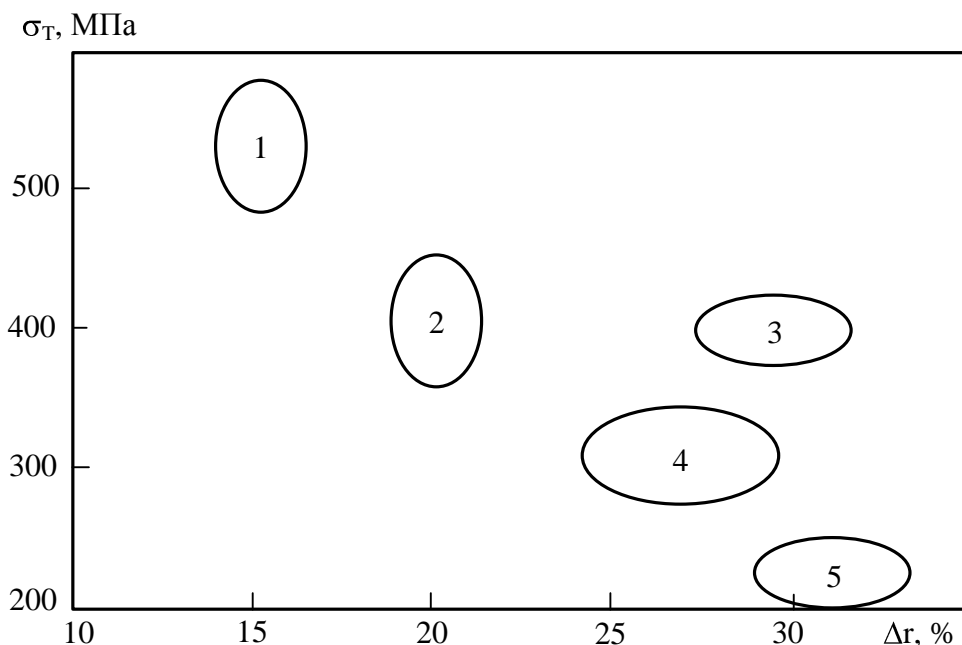


Рис. 4.34. Механические свойства продукции процесса Castrip: 1 – при высоком содержании примесей или при быстром охлаждении; 2 – при охлаждении с умеренной скоростью; 3 – при горячей прокатке с пониженной температурой конца прокатки; 4 – в случае типичной продукции; 5 – при низкой скорости охлаждения

В-третьих, на установке можно производить гиперохлажденную полосу («Hypercooled strip» – фабричная марка фирмы «Castrip LLC») с хорошим качеством, причем при выплавке стали можно использовать металлическую шихту значительно более низкого качества, чем это допускается в настоящее время.

Исчезает горячеломкость стали, поскольку примеси, понижающие температуру плавления на границах зерен стали, не могут мигрировать к этим границам, так как расплавленная сталь затвердевает в течение миллисекунд.

Одна из технических проблем, возникающая при совмещении разливки и прокатки, – трение корочки кристаллизующегося слитка о стенки кристаллизатора.

Поиски технических решений, позволяющих устранить (или существенно уменьшить) трение при скольжении корочки слитка о стенки кристаллизатора и обеспечивающих возможность повышения скорости разливки, привели к созданию так называемых *литейно-прокатных комплексов*. Одно из технических решений было предложено металлургами Японии, создавшими *колесно-ленточный агрегат*, названный ими *ротормым*. Агрегат (рис.4.35) включает вращающееся ленточное колесо

диаметром 3 м с выемкой трапецеидального сечения на ободу и прижимаемую к ободу на участке примерно 90 град. бесконечную стальную ленту, которые образуют таким образом кристаллизатор длиной 1,8 м.

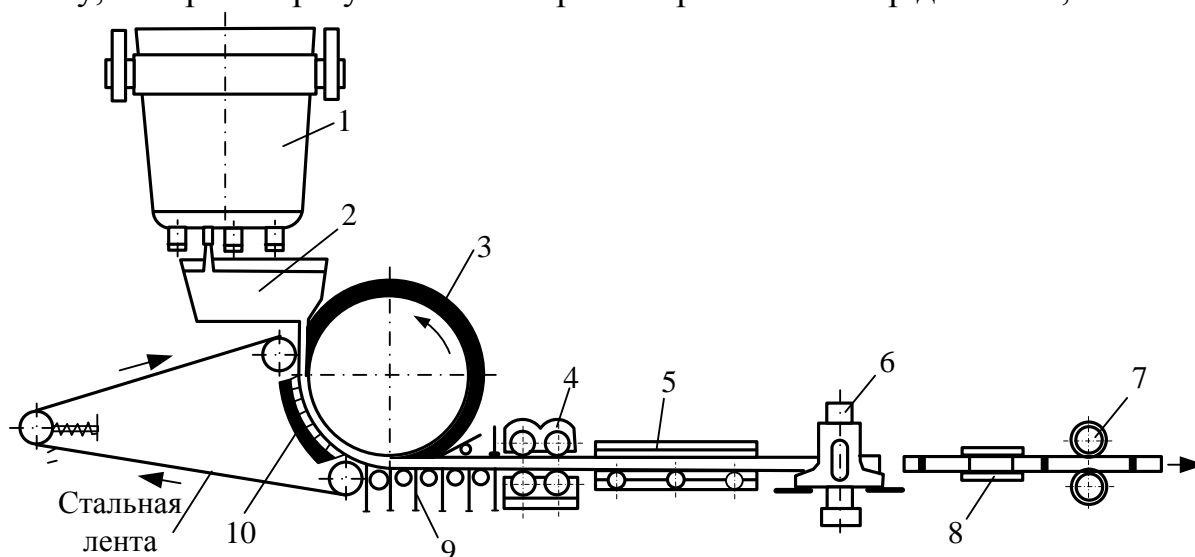


Рис. 4.35. Колёсно-ленточная МНЛЗ, совмещённая с прокатным станом конструкции Hitachi (Япония): 1 – сталеразливочный ковш; 2 – промежуточный ковш; 3 – литейное колесо; 4 – тянущие ролики; 5 – зона выравнивания температуры; 6 – ножницы; 7 – горизонтальная клеть; 8 – вертикальная клеть; 9 – направляющие ролики; 10 – охлаждение ленты

Благодаря большей (в 2,5 раза), чем обычно, длине кристаллизатора и относительной неподвижности заготовки и кристаллизатора производительность такой установки существенно выше производительности установок традиционного типа. На выходе с колеса заготовку разгибают по плавной траектории при помощи водоохлаждаемого клина и ряда роликов. Затем заготовка проходит через правильное устройство, зону форсуночного охлаждения, устройство для выравнивания температуры по сечению и поступает в обжимную клеть, формирующую из трапецеидальной (площадь поперечного сечения 18500 мм^2) квадратную (сечением $120 \times 120 \text{ мм}$) заготовку. В процессе обжатия скорость выхода заготовки повышается с 4,2 до 5,5 м/мин (рис. 4.36).

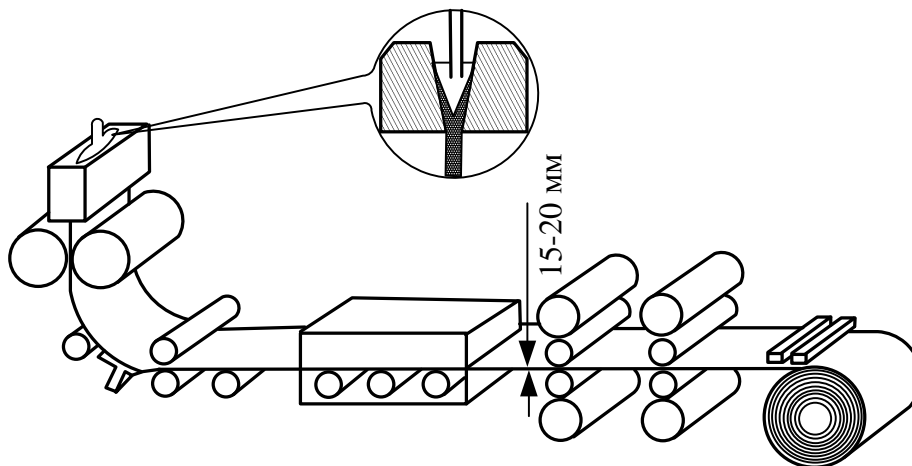


Рис. 4.36. Схема литья тонких слэбов с обжатием и их горячая прокатка

Фирмы Mannesmann Demag («Маннесман-Демаг») и Mefos («Мефос») разработали способ бесслиткового литья полосы (способ DSC). Полосу толщиной 5 – 10 мм получают в ленточном кристаллизаторе. После отливки полоса подвергается горячей прокатке в двух или трех клетях (рис. 4.37). Из промежуточного разливочного устройства жидкая сталь выливается на постоянно движущуюся ленту транспортера, которая интенсивно охлаждается снизу (водяное струйное или форсуночное охлаждение) в соответствующей зоне охлаждения. После этой зоны полностью затвердевшая полоса подается в вытягивающее устройство, а затем в клеть прокатного стана.

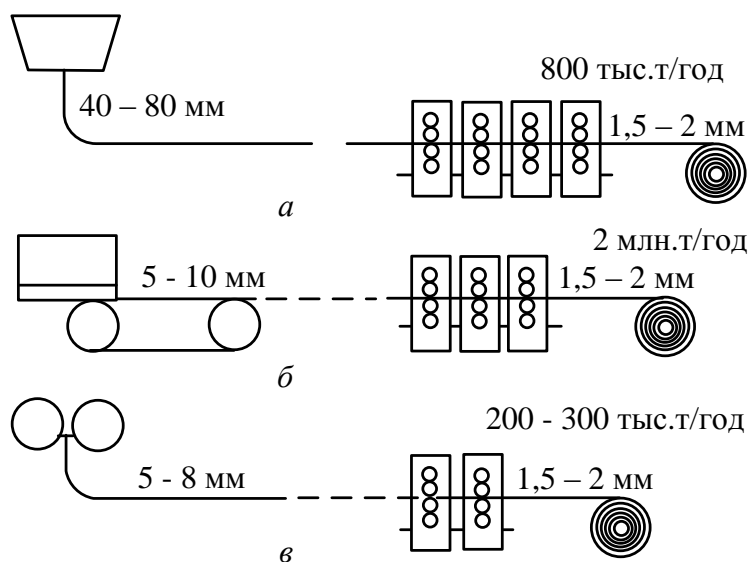


Рис.4.37. Схема агрегатов по производству горячекатаных полос и их производительность по разным технологиям: а – тонкие слэбы; б – тонкие полосы, ленточный кристаллизатор; в – тонкие полосы, валковый кристаллизатор

В Германии разработан «модифицированный» процесс, который в отличие от обычного DSC не требует промежуточной горячей деформации. Полоса толщиной 1 – 3 мм после разливки на движущуюся ленту сразу может подвергаться холодной прокатке (рис. 4.38, а). Возможна также разливка на тонкую полосу толщиной 1 – 3 мм для непосредственного получения рулонов горячекатаной полосы. Жидкую сталь заливают в зазор между двумя валками, находящимися во встречном вращении (рис. 4.38, б).

Возникло так называемое *инверсионное литье* (рис. 4.39). Оно представляет собой процесс, по которому полоса-подложка толщиной 0,5 – 2,0 мм с определенной температурой (например, комнатной) пропускается в течение определенного времени через ванну с жидкой сталью, имеющей контролируруемую температуру. За время контакта между полосой-подложкой и ванной некоторое количество жидкого металла кристаллизуется на подложке и вытягивается вместе с ней уже в виде композиционного изделия с контролируемой конечной толщиной. Представляется возможным получать таким процессом круглые изделия и фасонные профили, а также композиционный материал в виде листов толщиной 1 – 10 мм и шириной 200 – 1000 мм, которые могут быть переданы для дальнейшего передела непосредственно на стан холодной прокатки.

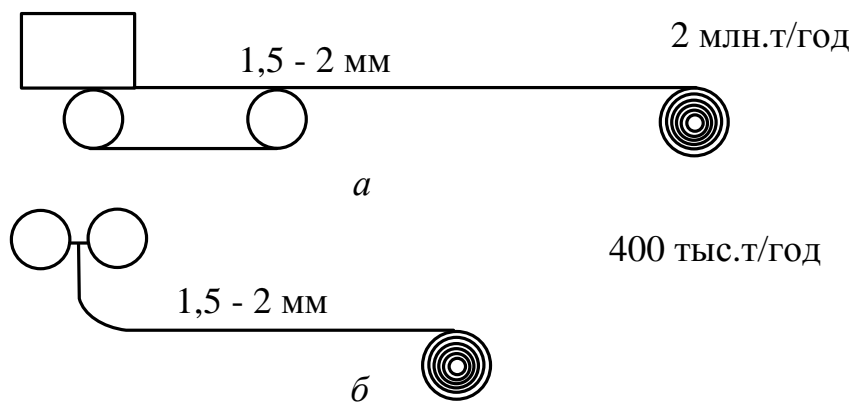


Рис. 4.38. Схемы агрегатов по производству непрерывнолитых тонких полос для холодной прокатки и их производительность по разным технологиям: а – ленточный кристаллизатор; б – валковый кристаллизатор

Толщина полосы на выходе из ванны 3,5 мм

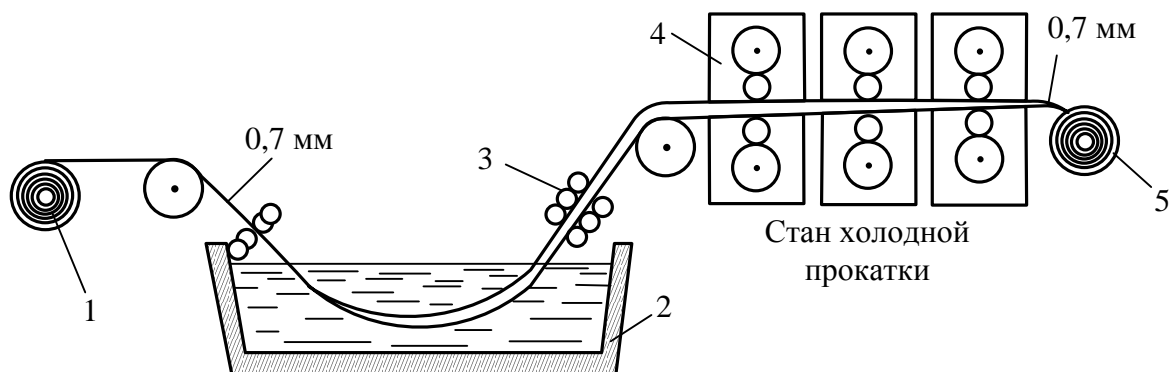


Рис. 4.39. Схема инверсионного литья полос и их холодной прокатки:
1 – разматыватель полосы-подложки; 2 – ванна с расплавленным металлом;
3 – обжатие полосы с горячим покрытием; 4 – стан холодной прокатки;
5 – моталка

Таким образом, развитие методов непрерывной разливки привело к большим изменениям в листопрокатном производстве.

Работы по созданию новых технологий производства тонкого листа и ленты ведутся и в нашей стране. В качестве примера можно отметить выполненную ВНИИметмашем разработку литейного агрегата, предназначенного для производства подката с особыми свойствами из нержавеющей, магнитоотрицательных, резистивных, жаростойких и других сплавов на основе железа методом непрерывной разливки. Сверхбыстрое охлаждение жидкого металла обеспечивает получение микрокристаллической структуры и повышает физические свойства готовой продукции, получаемой на последующих стадиях обработки.

Расплавленный металл подается из индукционной печи или из ковша (рис. 4.40), установленного на подъемно-поворотном столе, в зазор между двумя водоохлаждаемыми валками, находящимися во встречном вращении. Охлаждающие валки имеют бронзовые бандажи с различными вариантами охлаждения, а также механизм зачистки и шлифовки поверхности. Расплав заливают через тонкостенное сопло с щелевидным отверстием. Постоянный расход расплава обеспечивается системой управления через вычислительный комплекс. С торцов валков металл удерживается с помощью специальных ограничителей. Выходящая из валков полоса проходит систему вторичного охлаждения и далее передается в обжимную клетку и ножницы. Установленные в конце линии тянущие ролики в паре с моталками позволяют разливать до 12 т металла в непрерывном режиме.

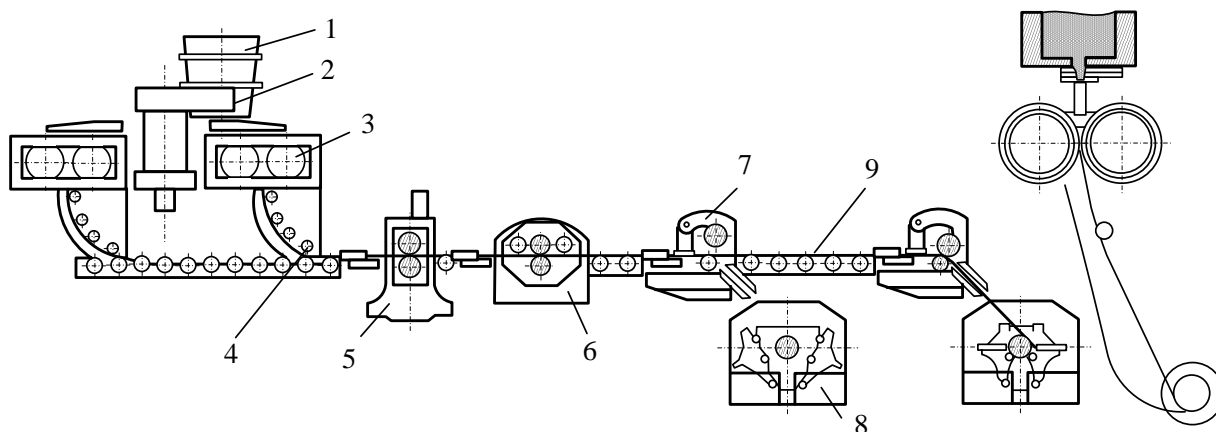


Рис. 4.40. Литейный двухвалковый агрегат для производства подката толщиной 1 – 5 мм: 1 – ковши; 2 – подъемно-поворотный стол; 3 – двухвалковая литейная машина; 4 – вторичное охлаждение; 5 – обжимная клеть; 6 – ножницы; 7 – тянущие ролики; 8 – моталка; 9 – полоса

Предлагаемые технология и оборудование обеспечивают благодаря непрерывному получению листа непосредственно из жидкого металла значительное сокращение числа операций обработки давлением и промежуточных нагревов. При этом энергозатраты снижаются на 30 – 50 %, в 5 раз уменьшены капитальные и эксплуатационные затраты, сокращается потребность в производственных площадях, особенно при производстве энергоемких изделий из трансформаторной и нержавеющей стали.

Глава 5. Основные технологические узлы МНЛЗ

5.1. Стенды сталеразливочных и промежуточных ковшей

Основными устройствами, применяемыми для транспортировки сталеразливочных ковшей, являются самоходные тележки, краны, поворотные и стационарные стенды.

Кран представляет собой наиболее мобильный агрегат, но он не экономичен вследствие высокой стоимости. Кроме того, разливочный кран нуждается в дополнительном передаточном кране или тележке. Широкое применение метода «плавка на плавку» потребовало разработки способов быстрой замены сталеразливочных ковшей. Эта операция на современных МНЛЗ производится при помощи сталеразливочных стендов. По конструкции и принципу работы сталеразливочные стенды делятся на самоходные и поворотные. Самоходный стенд представляет собой порталый или полупортальный кран, имеющий проем для размещения сталеразливочных ковшей (рис. 5.1). Кран перемещается из резервного положения в рабочее над кристаллизатором по рельсам на разливочной площадке и снабжен механизмами для перемещения, подъема и взвешивания сталеразливочного ковша с металлом. Ковш 1 мостовым краном устанавливается на тележку 2, на другой тележке 3 расположен ковш 4, из которого производят разливку. Применение самоходных стендов связано со следующими недостатками: необходимо иметь усиленные металлоконструкции МНЛЗ, способные выдержать дополнительную нагрузку, возникающую под действием массы стенда с ковшем; кран стенда занимает много места и загромождает разливочную площадку; в случае прорыва металла, когда возникает необходимость слива из ковша остатков металла, необходимо предусматривать наличие аварийных емкостей на разливочной площадке, что сокращает площадь, необходимую для работы операторов в процессе разливки и во время ремонтов МНЛЗ; наиболее эффективно процесс серийной непрерывной разливки осуществляется при наличии двух стендов, что требует увеличения капитальных и эксплуатационных затрат.

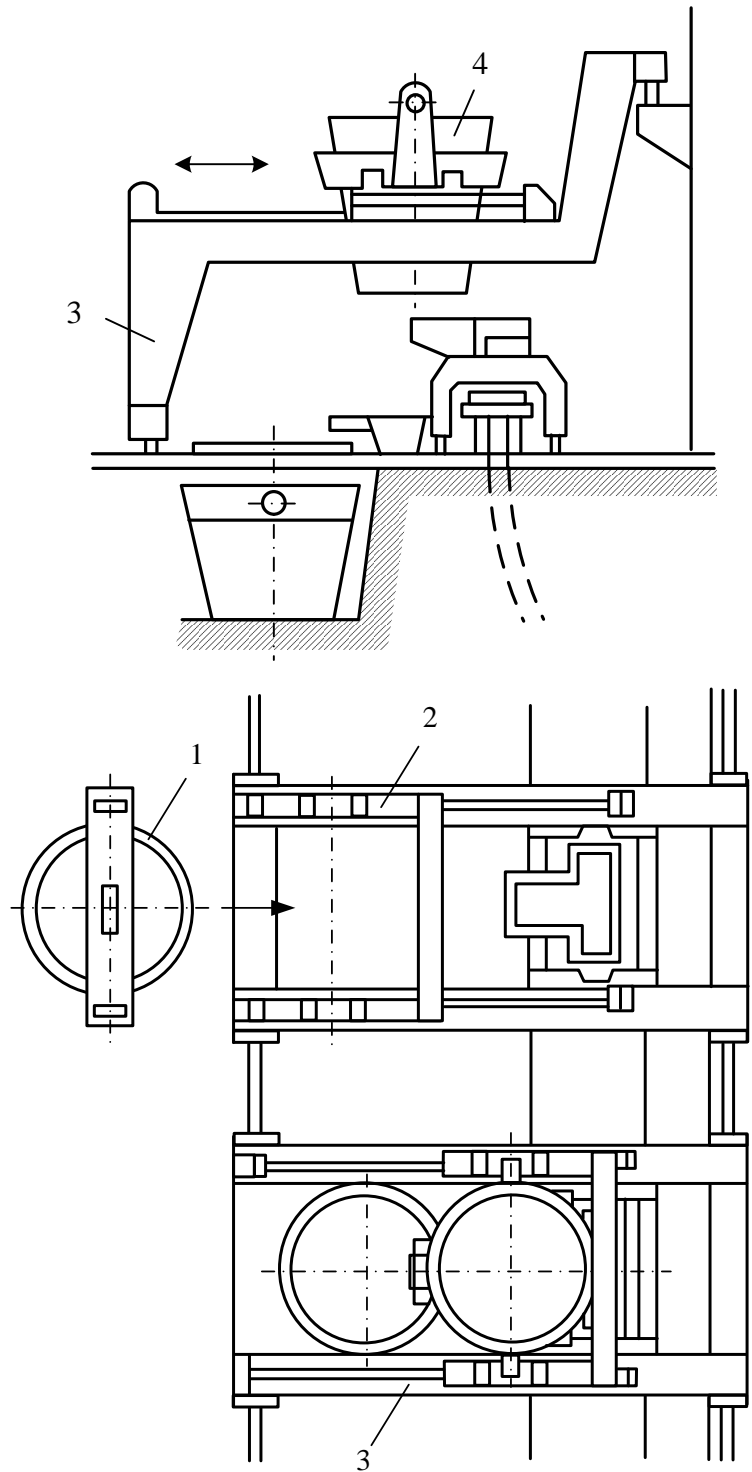


Рис. 5.1. Схема самоходного стенда

Более совершенным конструктивным решением, которое получило широкое применение на современных слябовых и сортовых МНЛЗ, является использование поворотных стендов (рис. 5.2). Поворотный стенд состоит из опорных элементов, поворотных

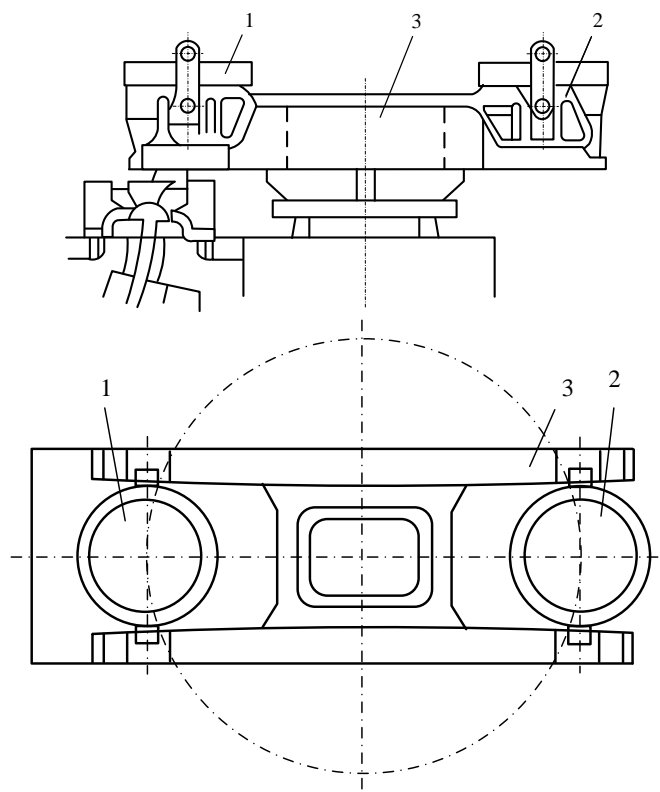


Рис. 5.2. Схема поворотного стэнда

частей с приводом поворота и подъема сталеразливочных ковшей и устройства для их взвешивания. На большинстве стэндов осуществляется одновременное вертикальное перемещение ковшей. Это уменьшает время замены ковша и загрузки крана. Ковш 1 устанавливают на рычагах вращающегося стола 3 и производят разливку. После того как на стол установят ковш 2, а из ковша 1 закончат разливку, его поворачивают на 180 град. и начинают разливку из ковша 2. Ковш 1 снимают со стэнда и транспортируют в отделение подготовки сталеразливочных ковшей для его подготовки к следующей плавке. Применяют также стэнды с независимым перемещением ковшей. Этот вариант наиболее предпочтителен, так как обеспечивает большую гибкость в работе. Поворотный стэнд имеет следующие преимущества перед самоходным: установка сталеразливочного ковша производится вне зоны разливки; поворот стэнда на 90° обеспечивает обслуживание краном всей разливочной площадки; аварийный слив металла из сталеразливочного ковша может осуществляться вне разливочной площадки. Продолжительность прерываний струи, поступающей в промежуточный ковш, составляет примерно 90 с.

5.2. Тележки и поворотные столы промежуточных ковшей

В процессе серийной разливки возникает необходимость быстрой замены промежуточных ковшей. Эта операция осуществляется при помощи поворотных столов или самоходных тележек. Тележки и поворотные столы должны обеспечивать устойчивую разливку методом «плавка на плавку», защиту струи металла (поступающего в кристаллизатор) от вторичного окисления и соответствовать требованиям автоматизации подвода металла из сталеразливочного ковша в промежуточный. Первое условие выполняется, если механизмы тележек и поворотных столов обеспечивают замену промежуточных ковшей за время менее 1 мин. Второе условие, связанное с применением удлиненных стаканов, требует использования механизмов для подъема промежуточных ковшей на высоту 0,6 – 0,8 м. Для автоматизации процесса непрерывной разливки поворотные столы имеют датчики, измеряющие массу жидкого металла в промежуточном ковше, дающие импульс на управление (стопором) шибером сталеразливочного ковша. Поворотные столы (рис. 5.3), снабженные механизмом подъема ковша и массоизмерительным устройством, получили ограниченное применение, их устанавливают на МНЛЗ с самоходными сталеразливочными стендами или при разливке стали с использованием крана.

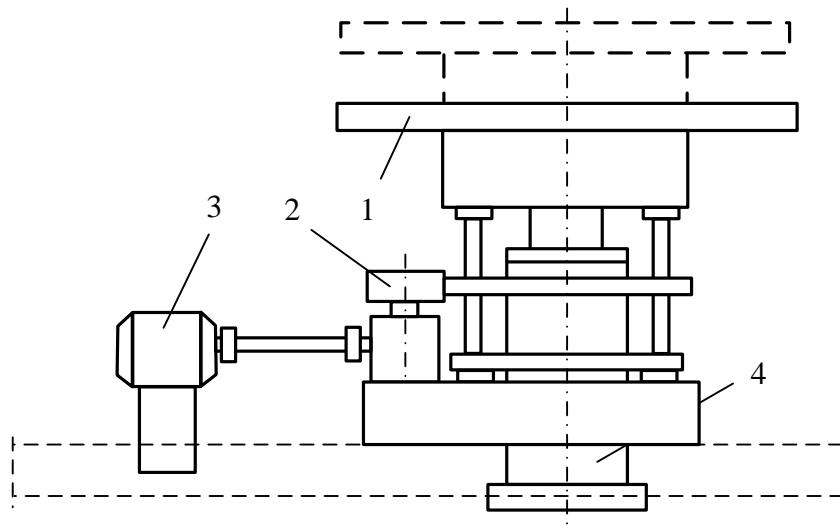


Рис. 5.3. Схема поворотного стола промежуточного ковша: 1 – платформа промежуточного ковша; 2 – привод поворота; 3 – электродвигатель; 4 – гидроцилиндр подъема

На МНЛЗ, снабженных поворотными сталеразливочными стендами, нашли применение самоходные тележки с вертикальным перемещением промежуточного ковша и массоизмерительным устройством. Ха-

рактерной особенностью тележек (рис. 5.4) является консольное распределение подъема платформы, на которой установлен промежуточный ковш, что обеспечивает хороший обзор зеркала металла в кристаллизаторе и свободный доступ к нему в процессе разливки.

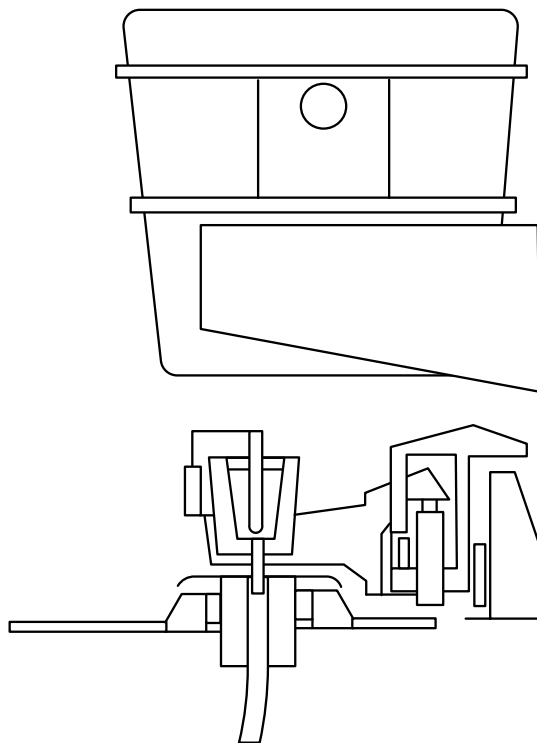


Рис. 5.4. Тележка промежуточного ковша

Тележки обеспечивают подъем промежуточных ковшей на высоту до 0,08 м и снабжены устройствами для центрирования ковшей относительно кристаллизаторов. Продолжительность перевода промежуточных ковшей из резервной позиции в рабочую не превышает 30 с. Тележка перемещается по рельсам, уложенным между сталеразливочным стандом и кристаллизаторами. Благодаря такому расположению рельсовых путей обеспечивается доступ к оборудованию радиального участка МНЛЗ.

5.3. Промежуточные ковши и оптимизация их использования

Важным элементом МНЛЗ является промежуточный ковш. Рациональная его конструкция, контроль уровня металла, использование специальных устройств для подогрева металла, для введения в металл различных добавок и т.д. позволяют: 1) обеспечить необходимые и стандартные во времени условия разливки (неизменное ферростатическое давление, малые колебания температуры металла); 2) использовать

промежуточный ковш как дополнительный агрегат для внепечной обработки металла с целью перемешивания, дегазации, всплывания включений, раскисления, корректировки состава и т. п. Для успешной работы технологического узла сталеразливочный ковш – промежуточный ковш – разливочный стакан требуются высококачественные огнеупоры разного состава (рис. 5.5). Особое качество огнеупоров необходимо для футеровки зоны падения струи (например, муллит). В зависимости от используемых огнеупорных материалов промежуточные ковши делят на три типа:

1) Нагреваемые перед разливкой до 1100 °С (*теплые*). На рабочую футеровку наносят слой магнетитовой защитной массы (в зонах максимального износа).

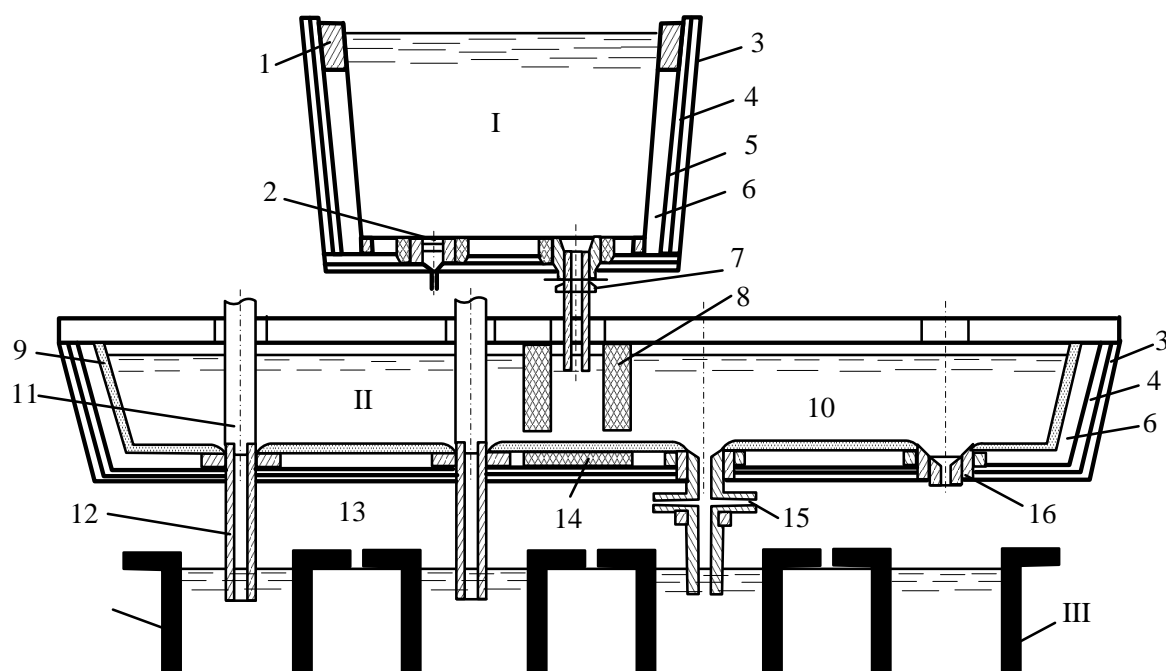


Рис. 5.5. Огнеупорные изделия, применяемые при непрерывной разливке стали: I – сталеразливочный ковш; II – промежуточный ковш; III – кристаллизатор; 1 – шлаковая зона (например, магнетит); 2 – пористый блик; 3 – изоляция; 4 – арматурный слой футеровки (например, доломит на смоляной связке); 5, 6 – слои футеровки; 7 – шиберный затвор с защитной трубкой; 8 – перегородка; 9 – защитное покрытие; 10 – плиты холодного промежуточного ковша; 11 – стопор-моноблок; 12 – погружной стакан (цельный); 13 – то же, составной (из двух частей); 14 – отбойная плита; 15 – шиберный затвор промежуточного ковша; 16 – дозатор для разливки открытой струей

2) Нагреваемые газокислородной горелкой до более 1500 °С (*горячие*). Промежуточные ковши применяют при определенных техноло-

гических и металлургических условиях и футеруют высококачественным (примерно 96 % MgO) магнезитовым кирпичом.

3) Неподогреваемые перед разливкой (*холодные*). В зоне контакта с расплавом в таких ковшах укладывают плиты из основных или кислых огнеупоров (рис. 5.6).

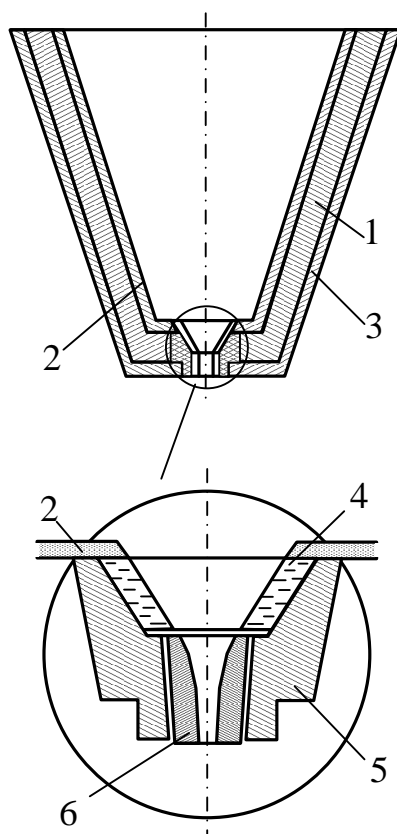


Рисунок 5.6. Конструкция холодного промежуточного ковша: 1 – футеровка; 2 – изоляционная плита, 3 – кожух; 4 – изоляционный конус для защиты гнездового кирпича; 5 – гнездовой кирпич; 6 – дозатор

Высококачественные огнеупорные плиты (примерно 85 % SiO₂) имеют малую кажущуюся пористость (1,0 – 1,1 г/см³) и соответственно малую теплопроводность (0,20 – 0,25 Вт/м·К). Толщина плиты примерно 30 мм. Использование армирующих волокон (например, асбеста) при изготовлении плит обеспечивает достаточную прочность. Соединительные грани плит выполняют уступами, которые при укладке двух соседних плит перекрываются. Швы дополнительно уплотняют быстротвердеющей обмазкой. Для подогрева металла используют электродуговые или плазменные установки.

Промежуточные ковши изначально входили в систему непрерывной разливки стали, выполняя роль емкости для распределения металла по ручьям МНЛЗ. Однако по мере эксплуатации ковшей, проведения исследований по поведению в них металла стало очевидным, что промежуточные ковши имеют функции, далеко выходящие за рамки первоначальных установок.

5.3.1. Футеровка промежуточных ковшей

В промежуточном ковше расходуется около 90 % всех огнеупоров, применяемых при непрерывной разливке стали.

Арматурный слой футеровки промежуточных ковшей ранее выкладывали шамотными, высокоглиноземистыми или магнезиальными кирпичами, но в настоящее время повсеместно идет их замена бетонными футеровками, распространяется применение высокоглиноземистых низкоцементных бетонов.

Низкоцементный высокоглиноземистый бетон, отличающийся низкой усадкой и высокой прочностью, разработан японской фирмой «Sumitomo Metals». Бетон муллитового состава (63 % Al_2O_3 , 34 % SiO_2) содержит тонкомолотые порошки муллита и андалузита, а также стальное волокно (2 %). Материал имеет следующие показатели после обжига с 3-ч выдержкой при 1000 °С: усадка 0,03 %; предел прочности при изгибе 14,0 МПа, открытая пористость 16,5 %. Добавка воды составляет 6 %. В результате применения бетона в 32-х промежуточных ковшах срок службы монолитной футеровки по сравнению с кирпичной кладкой увеличился почти в четыре раза (со 108 до 420 плавов). Аналогичные результаты получены на заводе фирмы «Nippon Steel» в Круэ.

Промежуточные ковши могут быть как источниками дополнительного загрязнения металла неметаллическими включениями за счет размывания их футеровки металлом и растворения в металле окисленных настывей, так и отстойниками, в которых неметаллические включения укрупняются и удаляются из металла. Для активизации и максимально полного удаления включений в промежуточном ковше на поверхности металла должен находиться покровный шлак, ассимилирующий включения и предотвращающий окисление металла.

Были проведены обширные эксперименты в 60-х промежуточном ковше, главным образом, по влиянию состава покровного шлака на его взаимодействие с металлом. Состав шлаков изменяли от $CaO-Al_2O_3$ (по 50 % каждого компонента) до 100 % MgO . Установлено, что шлак должен иметь температуру плавления, позволяющую ему быть жидким при температуре жидкой стали, т.е. ровным слоем покрывать поверхность

стали в ковше и, кроме того, в шлаке должно быть минимальное содержание компонентов, имеющих меньшее сродство к кислороду, чем алюминий (например, SiO_2), для предотвращения окисления алюминия. При использовании флюса, содержащего 48 % CaO , 37 % Al_2O_3 и 15 % MgO (температура плавления 1530 °С), общее содержание кислорода в стали оказалось в 10 раз меньшим, чем при использовании флюса из чистого MgO . Отмечается, что защита флюсом в промежуточном ковше гораздо эффективнее защиты подачей аргона из-за подсоса воздуха через неплотности прилегания крышки к кожуху в последнем случае.

Как правило, промежуточные ковши снабжаются перегородками для регулирования потоков металла. В ряде случаев перегородки промежуточного ковша имеют оригинальную конструкцию, например, снабжаются каналами, изменяющими течение проходящего через них металла таким образом, чтобы облегчалось всплывание неметаллических включений из металла в шлак. Целесообразно рассмотреть пример такого промежуточного ковша емкостью 25 – 40 т, сконструированного и успешно внедренного на ОАО «Азовсталь» (рис. 5.7).

Удаление крупных (более 20 мкм) неметаллических включений из стали основано на рациональном распределении стаканов, устанавливаемых в вертикальных перегородках промежуточного ковша (рис. 5.7, правая часть). При прохождении металла из приемной камеры через эти стаканы в раздаточной камере возникает ряд затопленных турбулентных струй, содержащих дисперсные включения огнеупоров и продуктов раскисления стали. Истечение струй происходит вследствие разности уровней металла в приемной и раздаточной камерах. Скорость движения металла по мере удаления от стакана уменьшается вследствие присоединения масс окружающей среды. Если осевая скорость в начальном и основном участках струй больше, чем скорость окружающей среды, то по оси струи создаются области пониженного давления (разрежение), в которые затягиваются включения. Этим и объясняется рафинирующая роль затопленных струй. Чем больше диаметр каналов в перегородке промежуточного ковша и больше выходная скорость струй из них, тем выше их рафинирующий эффект.

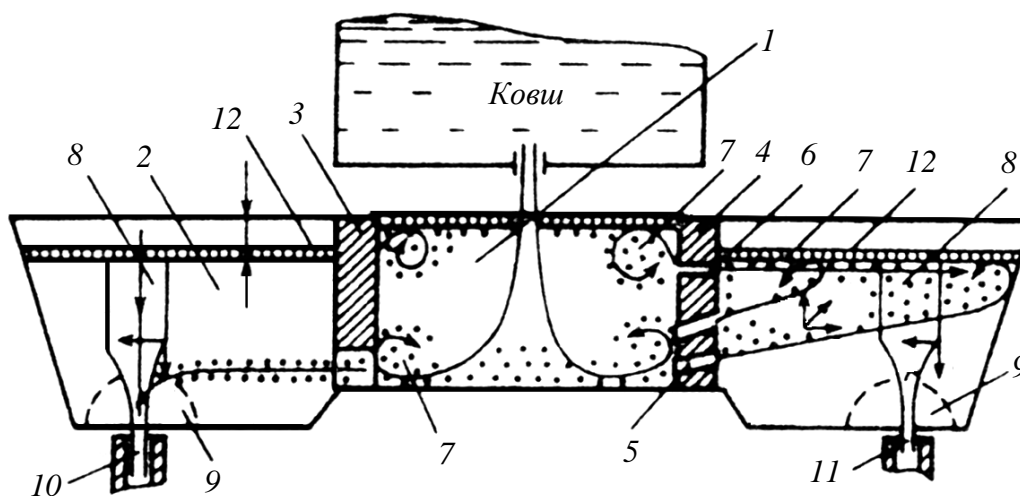


Рис. 5.7. Схема работы промежуточного ковша: 1 и 2 – приемная и раздаточная камеры; 3 и 4 – обычная и опытная перегородки; 5 и 6 – наклонный щелевидный и прямой цилиндрический каналы; 7 – скопление включений; 8 – зона взаимодействия разливочного стакана; 9 – зона затягивания; 10 и 11 – сравнительный и опытный ручки; 12 – шлак

Для достижения максимального эффекта желательно обеспечить большее число каналов, равномерно расположенных по высоте перегородки. Равнодействующая сил, воздействующих на истекающую из канала струю, всегда направлена вверх, т.е. к поверхности шлакового покрова, которым и адсорбируются всплывающие включения.

Цилиндрические каналы формируют прямые потоки, которые защищают металл от затягивания покровного шлака.

Непрерывная разливка промышленных сталей 09(10)Г2ФБ, 13ГСУ показала, что устройство вертикальных перегородок не вызывает осложнений при массовом производстве. Они достаточно стойки и надежны. Загрязненность сталей неметаллическими включениями всех типов (в основном более 20 мкм) уменьшилась в 1,8 – 2,2 раза.

Удаление из стали мелких (менее 20 мкм) неметаллических включений достигается созданием за вертикальной перегородкой промежуточного ковша сплошной завесы (рис. 5.8) из газа, подаваемого вертикально через пористый блок.

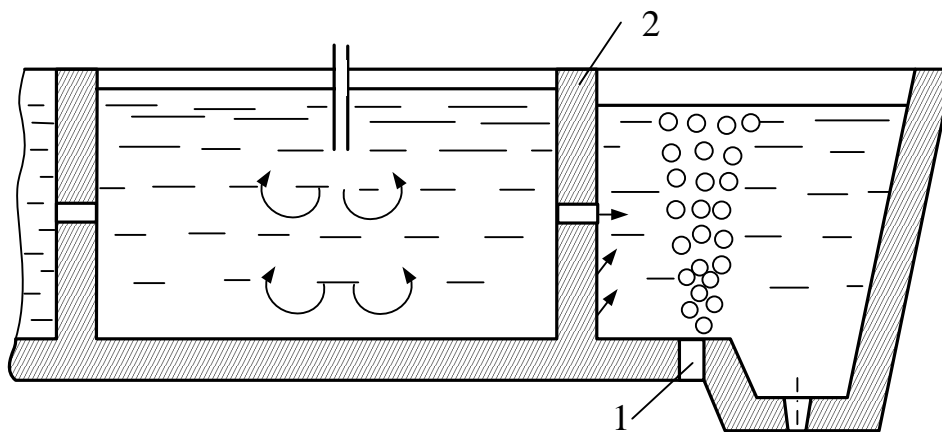


Рис. 5.8. Схема универсальной фильтрационной системы удаления включений в промежуточных ковшах МНЛЗ: 1 – продувочная фурма, 2 – фильтрационная перегородка

Для этого на дно по поперечному сечению ковша устанавливали каналный блок с диаметром выходных пор 102 мм. При расширении двухфазной струи в затопленном пространстве, создаваемом этим блоком, образуется поглощающая дисперсные частицы газожидкостная эмульсия, переносящая их вертикально вверх. Блок размерами 70×80×850 мм устанавливали за вертикальной перегородкой с фильтрующими элементами. Давление подаваемого в блок газа колебалось в пределах 0,1 – 0,2 МПа при расходе 20 – 30 м³/ч.

По результатам изучения качества металла установлено, что предложенная схема разлива позволяет уменьшить общий индекс загрязненности стали неметаллическими включениями размером менее 10 – 20 мкм в 2,2 – 2,5 раза; относительное удлинение сталей Fe430А и RSt37-2 возрастает на 10 – 15 %; отсортировка ультразвуковым контролем листов из опытного металла составила 0,5 %, тогда как у сравниваемого металла она обычно находилась на уровне 1,5 %.

Проводились также эксперименты по окончательному легированию металла в промежуточных ковшах и его обработке различными десульфураторами, но широкого применения это направление не получило.

Немаловажное значение имеет контакт с атмосферой струи металла, вытекающей из сталеразливочного ковша в промежуточный. Для предотвращения окисления этой струи и поглощения ею газов повсеместное распространение получили защитные трубы между ковшами, изолирующие металл от атмосферы, в которые в последние годы для большей эффективности стали вдувать инертный газ – аргон. В процессе изучения эффективности этого приема на заводе фирмы «Sumitomo

«Metal» в Касиме был разработан более современный способ защиты струи аргоном, вдуваемым в защитную трубу со щелевыми каналами.

На рисунке 5.9 показаны схемы обычной газовой защиты струи на участке между разливочным и промежуточным ковшами и более эффективной – с применением защитной трубы с щелевыми каналами.

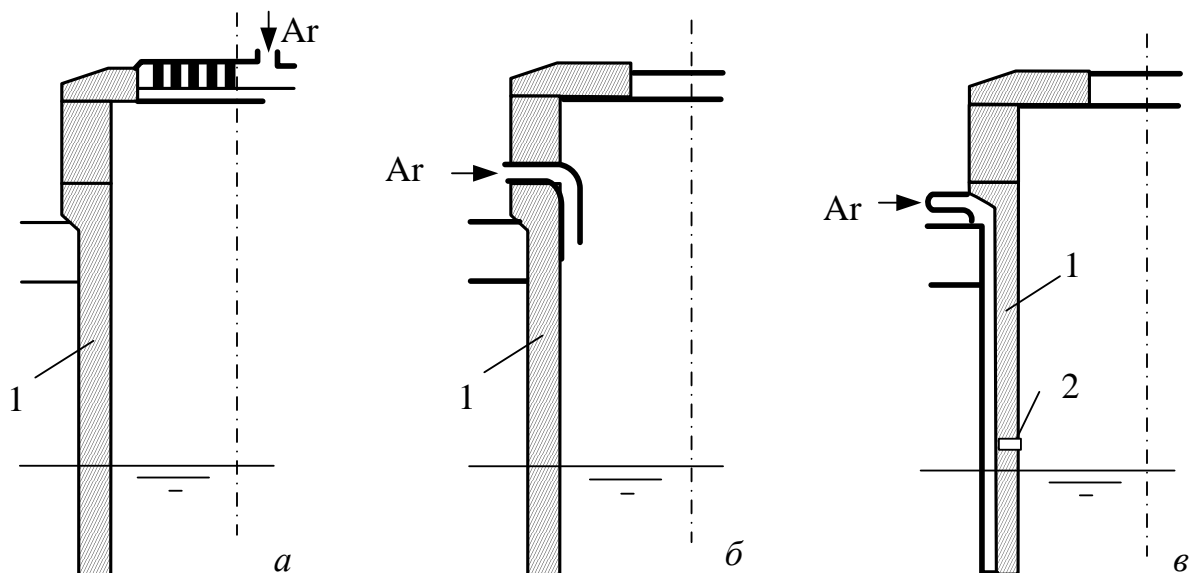


Рис.5.9. Обычная схема системы газовой защиты струи (а) и схемы с подводом аргона выше зеркала (б) и к зеркалу металла (в): 1 – защитная труба; 2 – щели

Промышленные испытания проводились для двух разновидностей новой защитной трубы: с подводом газа к зеркалу металла и выше зеркала. Установлено, что применение трубы со щелевыми каналами обеспечивает меньшее содержание азота в стали, что обусловлено почти вдвое меньшим парциальным давлением азота в газовой среде в объеме защитной трубы.

При прежнем способе защиты струи наблюдается увеличение содержания кислорода в период смены разливочных ковшей (при разливке «плавка на плавку»), что объясняется влиянием вторичного окисления. С защитной трубой усовершенствованной конструкции этого не наблюдается.

При обычном способе защиты струи внутри трубы на участке над уровнем металла образуется металлическая настывль. Наряду с другими факторами настывль препятствует серийной разливке с большим числом плавков в серии. При использовании усовершенствованной трубы настывль образуется гораздо реже, что позволяет увеличить число плавков в серии и многократно использовать защитную трубу без нарушения ре-

жима разливки.

Для защиты жидкой стали от окисления в промежуточном ковше обычно воздух замещают аргоном. Однако такая технология несовершенна из-за трудности полной герметизации промежуточного ковша. Более перспективной может оказаться защита поверхности металла низкоплавленым флюсом, о чем было сказано выше.

Для регулирования потоков металла в промежуточном ковше в Америке получил распространение способ установки на дне промежуточного ковша против падающей из разливочного ковша струи металла огнеупорной подушки специальной формы (рис 5.10).

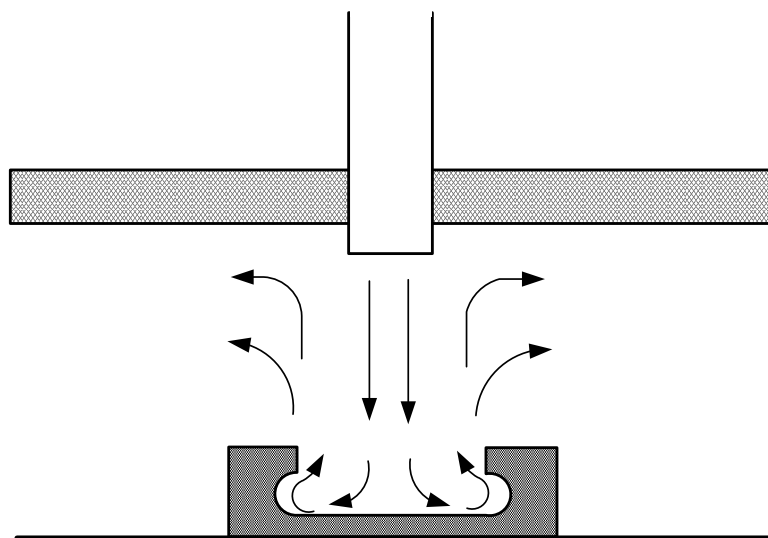


Рис. 5.10. Огнеупорная подушка в ковше

Изменение потоков в ковше с четырьмя выпускными отверстиями в этом случае показано на рис. 5.11.

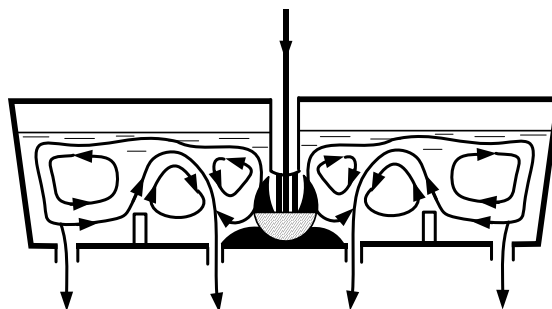


Рис.5.11.Схема потоков металла в промежуточном ковше с огнеупорной подушкой

Отмечается, что применение таких подушек позволяет повысить чистоту сталей за счет большего всплывания включений в покровный шлак, поддерживать в более спокойном состоянии уровень металла в промежуточном ковше, а также обеспечить более ровное течение разливки при смене разливочных ковшей.

Тем не менее, остался нерешенным вопрос повышения качества участков заготовок, отлитых в периоды нестабильной разливки, т.е. при замене разливочных ковшей.

В связи с этим были начаты разработки промежуточного ковша центробежной сепарации, в котором под действием электромагнитных сил на жидкую сталь создавались бы горизонтальные вращающиеся потоки в расплаве и благодаря центробежным силам включения сосредоточивались бы в центре ванны. Эффект отделения включений вращающимся электромагнитным перемешиванием был подтвержден авторами на экспериментальной модели периодического действия, а также в полупромышленном эксперименте с промежуточным ковшом емкостью 500 кг. Для подтверждения подобного эффекта на промышленной МНЛЗ провели эксперимент на слябовой МНЛЗ № 1 завода в Тибе фирмы «Kawasaki Steel», исследуя возможности выделения включений и механизм очищения жидкой стали.

Схема данного процесса приведена на рис. 5.12. С внешней стороны цилиндрической камеры I промежуточного ковша прикладывается подвижное электромагнитное поле, создающее в жидкой стали горизонтальные вращающиеся потоки. Поскольку включения легче жидкой стали, при вращении металла они скапливаются в центральной части камеры, где происходят их коалесценция и коагуляция. Жидкая сталь в чистом виде через камеру II поступает в кристаллизатор.

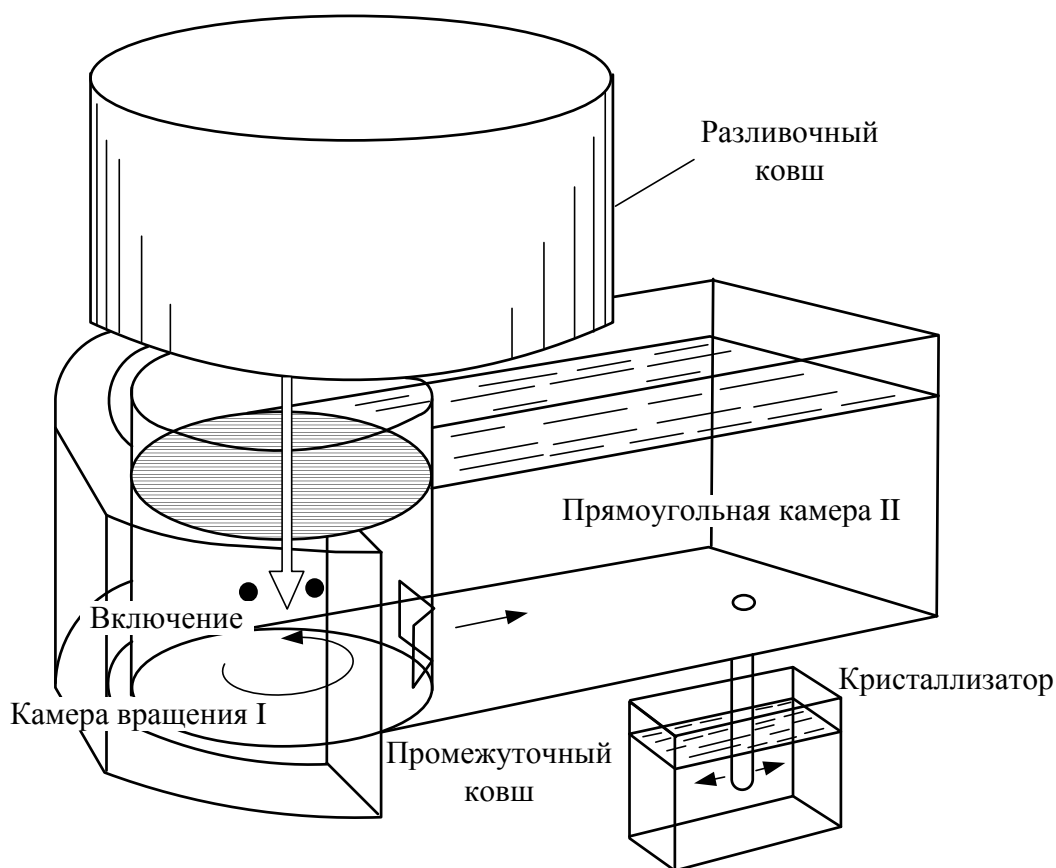


Рис. 5.12. Оборудование промежуточного ковша камерой I для электромагнитного перемешивания потока стали

Для создания буферной массы жидкой стали и уменьшения размеров устройства, генерирующего вращающееся электромагнитное поле, промежуточный ковш выполнен из двух камер: цилиндрической камеры I для вращения расплава стали (рис. 5.12) и камеры, где такое вращение отсутствует. Обе камеры соединены в нижней части. Разливку алюминийсодержащей коррозионностойкой стали ферритного класса провели серией из трех плавов с использованием 100-т разливочного и 10-т промежуточного ковшей. Частота вращения металла составляла 40 – 50 об./мин.

Высота уровня жидкой стали в промежуточном ковше в стабильный период разливки составляла 670 мм. В процессе замены разливочного ковша при снижении уровня стали в промежуточном ковше от предшествующего ковша до 300 – 500 мм начинали подавать сталь из последующего ковша со скоростью 3,5 – 6,5 т/мин до возвращения состояния к уровню стабильного периода (1,5 т/мин).

Из отдаленной камеры II промежуточного ковша (рис. 5.12) отбирали пробы жидкой стали и определяли в них общее содержание кисло-

рода при вращении стали и без него. Содержание растворенного кислорода в жидкой стали рассчитывали из равновесия с алюминием с учетом влияния хрома. Разницу между $[O_{\text{общ}}]$ и растворенным кислородом в жидкой стали рассматривали как кислород включений. За счет вращения расплава в камере I содержание кислорода, связанного во включениях, в жидкой стали отдаленной камеры II уменьшилось примерно в два раза.

Анализ проб из разливочного и промежуточного ковшей показал, что количество включений в пробах из промежуточного ковша без вращения стали в сравнении с количеством включений в пробах из разливочного ковша практически не уменьшилось. При вращении стали содержание включений уменьшается до 26 % от их содержания в стали в разливочном ковше.

Шлак как в сталеразливочном, так и в промежуточном ковшах затягивается в металл в результате возникновения его вихревого движения в конце выпуска металла из того или иного ковша. Для подавления преждевременного возникновения вихревого движения в разливочном ковше на его дне установили вертикальные перегородки, применение которых позволило существенно уменьшить остатки металла в разливочном ковше.

В промежуточном ковше с той же целью использовали огнеупорные гасители по торцам ковша (А на рис 5.13, б).

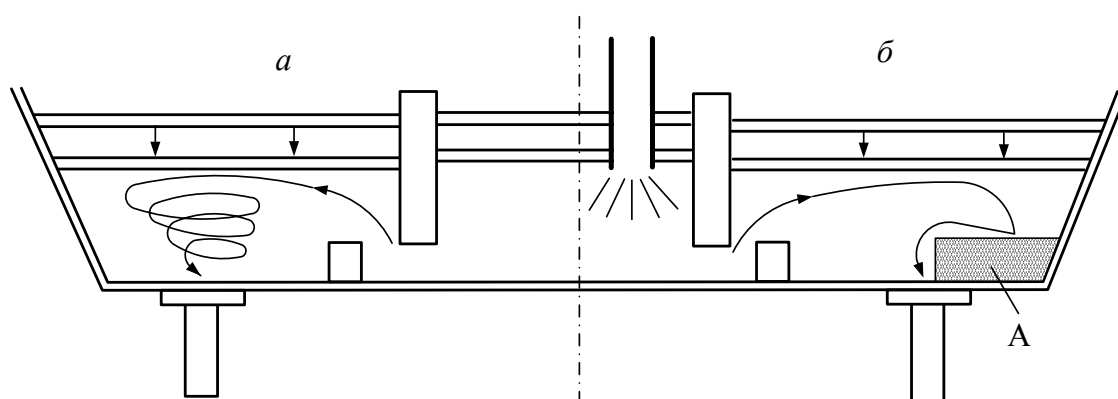


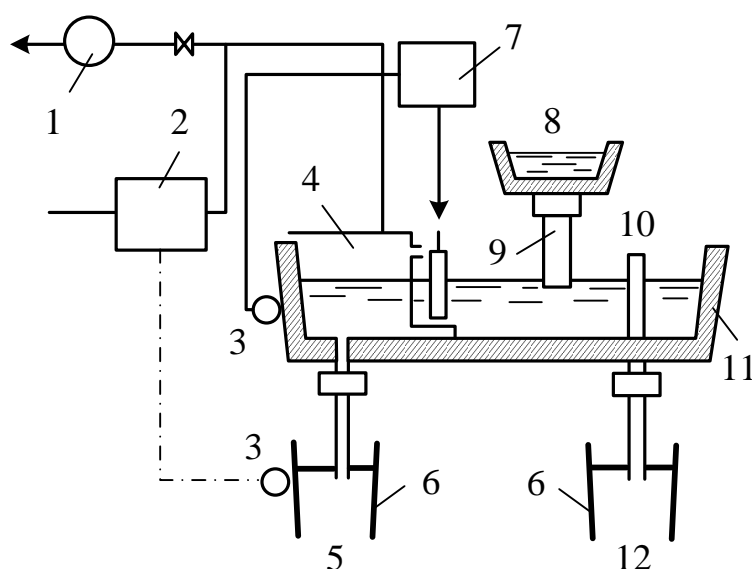
Рис. 5.13. Движение металла в промежуточном ковше без гасителей вихревых потоков (а) и после установки огнеупорного гасителя (б)

После установки огнеупорных гасителей вихревых движений металла в промежуточном ковше были исследованы неметаллические включения в металле последнего по ходу разливки сляба.

Индекс крупных включений в слябе с подавлением вихревых

движений металла снижен с 80 до 60 %.

Технологию с использованием вакуумного промежуточного ковша исследовала фирма «British Steel» (рис. 5.14). При использовании этой технологии обеспечивается низкий вакуум над поверхностью стали, находящейся в промежуточном ковше, чтобы можно было регулировать скорость выхода стали из ковша, в этом случае можно избежать применения стопорных устройств или скользящих затворов. При этом нет потребности во вдувании аргона, предотвращается забивание погружного стакана, турбулентность в кристаллизаторе сохраняется на низком уровне. Наблюдается эффект, аналогичный эффекту электромагнитного тормоза в части распределения потоков металла в кристаллизаторе и всплывания неметаллических включений. Также ожидают, что будет обеспечена более высокая гибкость процесса разливки.



*Рис. 5.14. Вакуумный промежуточный ковш фирмы «British Steel»:
 1 – вакуумный насос; 2 – контроль давления; 3 – датчик уровня;
 4 – вакуумная камера; 5 – опытный ручей; 6 – кристаллизатор; 7 – контроль уровня;
 8 – разливочный ковш; 9 – защитная труба; 10 – стопор;
 11 – промежуточный ковш; 12 – сравнительный ручей*

В этом процессе изменением давления в вакуумной камере регулируют уровень мениска в кристаллизаторе, а также скорость подачи стали в вакуумную камеру, чтобы можно было сохранить заданный уровень стали в этой камере. Первые производственные результаты подтверждают перспективность процесса. Сообщается, что такие проблемы, как подогрев ковша, начало разливки, безопасность работы, нашли адекватное решение.

5.3.2. Подогрев стали в промежуточном ковше

Подогрев стали в случае необходимости и регулирование ее температуры перед непрерывной разливкой в большинстве случаев осуществляются на установках печь-ковш. В последнее время все более широкое применение получает химический подогрев сжиганием алюминия в струе кислорода, что наиболее эффективно в вакууматорах и специальных установках типа HALT (под колпаком).

Гораздо реже применяется индукционный (из-за сложности оборудования) или дуговой (из-за науглероживания стали) подогрев в промежуточном ковше, но для дугового подогрева найдены более оптимальные решения.

На заводе фирмы «Nucor Steel» в Норфолке при выплавке стали в 50-т электропечах с использованием 15-т промежуточных ковшей провели детальное исследование изменения температуры стали от агрегата печь-ковш до литой заготовки. Без какого-либо подогрева в промежуточном ковше установили, что оптимальны следующие температурные условия перегрева:

- настроечная температура в промежуточном ковше на 30 град. выше температуры ликвидуса;
- диапазон температур по отношению к настроечной в промежуточном ковше в пределах плюс 15 и минус 10 град.;
- перегрев в сталеразливочном ковше выше настроечной температуры на 40 – 45 град.

Однако в результате влияния на реальную температуру многих факторов (задержек при выплавке и разливке, эффективности работы покровного шлака в промежуточном ковше и др.) колебания температуры оказываются большими, и в конечном итоге пришли к выводу, что единственным выходом является динамический подогрев стали в промежуточном ковше. Только в этом случае оказалось возможным снизить настроечную температуру и подогревать сталь без опасения во всех непредвиденных случаях выйти за нижнюю критическую границу температурного диапазона. Учитывая недостатки других способов, выбрали плазменный подогрев, разработанный фирмой «Plasma Energy», с использованием плазменной горелки с полым медным электродом и дуговым разрядом постоянного тока обратной полярности. Горелка диаметром 150 мм может работать на режимах по току до 2 кА при длине дуги 200 – 250 мм. В качестве стабилизатора дуги использован азот по соображениям экономичности и надежности работы установки. Подводимая к горелке электрическая мощность, параметры охлаждающей воды и плазмообразующего газа регулируются программом контроллером. Для

позиционирования горелки внутри промежуточного ковша и поддержания требуемой длины дуги используется механический подъемник. Включается и отключается горелка с пульта управления.

В дальнейшем систему подогрева усовершенствовали:

- реконструировали горелку, уменьшив габарит по длине с таким расчетом, чтобы ее можно было устанавливать и извлекать из промежуточного ковша в любое время;

- изменили конструкцию обратного электрода, применив простую стальную шину, прикрепленную болтами к кожуху промежуточного ковша. Этот способ обеспечил постоянный и хороший контакт между жидкой сталью и кожухом. Он позволил также легко удалять настывь и оказался дешевле, поскольку шины изготавливали из собственного плоского проката;

- установили систему непрерывного измерения температуры фирмы «Accumetrix», что дало возможность оператору постоянно контролировать температуру и своевременно регулировать мощность горелки.

Со времени установки системы плазменного подогрева среднюю температуру перегрева снизили на 10 град., сократив на 4 мин продолжительность энергоподвода к агрегату ковш-печь. Кроме того, пришли к выводу о значительно более высокой экономической эффективности подогрева в промежуточном ковше только последних 15 – 20 т стали с пониженной температурой. С установкой плазменной горелки повысилась точность регулирования температуры: отклонение от заданной температуры уменьшилось с плюс 10 до плюс 5 град. Более узкий допуск на температуру способствовал улучшению показателей процесса разливки и повышению качества литой заготовки.

Снижение средней температуры перегрева позволило повысить на 10 – 15 % среднюю скорость разливки и снизить тем самым длительность разливки в среднем на 4 мин.

Одним из основных положительных результатов внедрения подогрева стали в промежуточном ковше стала успешная разливка холодных плавов. В течение первого года эксплуатации системы плазменного подогрева с ее помощью удалось разлить 20 холодных плавов. Если принять во внимание, что типовая продолжительность рабочего цикла на МНЛЗ составляет около 1 ч, а убыток от потери производительности – 40 тыс. долл./ч, то один только этот положительный эффект окупает затраты на систему подогрева. В течение второго года эксплуатации было успешно разлито такое же количество холодных плавов.

Установка системы подогрева позволила также улучшить синхронизацию процессов выплавки и разливки. Это касается возможности не

только нормальной разливки холодных плавов, но и снижения скорости разливки, если на выплавку или рафинирование потребовалось дополнительное время. В некоторых случаях удалось увеличить длительность разливки на 30 мин без ее прерывания и снижения качества литой заготовки.

В некоторых марках сталей необходимо ограничивать содержание азота. Полученные данные показали, что из-за плазменного подогрева в промежуточном ковше за время от начала до окончания разливки содержание азота в стали повышается в среднем на 6 ppm. Такое повышение допустимо для большинства марок стали, выплавляемых в настоящее время на заводах фирмы «Nucor Steel». При разливке сталей, где азот имеет отрицательное влияние, должна быть предусмотрена возможность использования в плазменной горелке аргона. В перспективе фирма планирует применить систему регулирования состава рабочего газа, в результате чего горелка сможет работать на аргоне, азоте и их смеси с целью значительного уменьшения эксплуатационных расходов и насыщения стали азотом.

На первых этапах внедрения системы подогрева предполагали, что возможен повышенный износ огнеупоров. Но с начала ее применения не отмечено существенного снижения стойкости футеровки промежуточного ковша или защитной трубы разливочного ковша. Фактически за два года эксплуатации систем подогрева среднее число плавов на промежуточный ковш заметно увеличилось вследствие возможности более гибкого согласования процессов выплавки и разливки и поддержания более благоприятных условий разливки при подогреве в промежуточном ковше. В настоящее время главным фактором, лимитирующим кампанию промежуточного ковша, является стойкость скользящего затвора и/или погружного разливочного стакана.

Эксплуатационные затраты и стоимость технического обслуживания системы плазменного подогрева (включая энергоносители, азот, запасные детали и оплату труда) в течение последних двух лет не превысили 0,5 долл./т стали. В 1994 г. общие затраты на эксплуатацию и обслуживание системы составили 132621 долл. При этом масса стали, разлитой с применением плазменного подогрева, составила 372576 т. Следовательно, суммарные удельные затраты на систему нагрева составили 0,36 долл./т.

Коэффициент использования плазменной системы в среднем превысил 92 % и непрерывно повышался при снижении температуры перегрева. Операторы на агрегате ковш-печь уже привыкли отправлять ковши с более холодной сталью на МНЛЗ.

Согласно оценкам достигнутое снижение температуры перегрева

в среднем на 10 град. дало фирме «Nucor Steel» в 1994 г. экономию 188941 долл. (за счет меньших затрат на электроэнергию, огнеупоры и графитовые электроды для агрегата ковш-печь).

До монтажа системы плазменного подогрева количество холодных плавков составляло примерно 3 % от их общего числа. С применением подогрева этот показатель был снижен до менее 1 %.

В процессе реконструкции слябовой двухручьевой МНЛЗ на заводе фирмы SOLLAC во Флоранже в двухручьевую машину с отливкой двух блюмов в каждом ручье поставили плазменную установку на промежуточном ковше (рис. 5.15), которую применяют при отливке (в частности, рельсовой и кордной) сталей, требующих особо точного регулирования температуры разливки. На машине отливают 240-т плавки в четыре ручья со скоростью 0,85 м/мин, время разливки составляет 110 мин. В этих условиях подогрев стали в ковше и регулирование ее температуры необходимы.

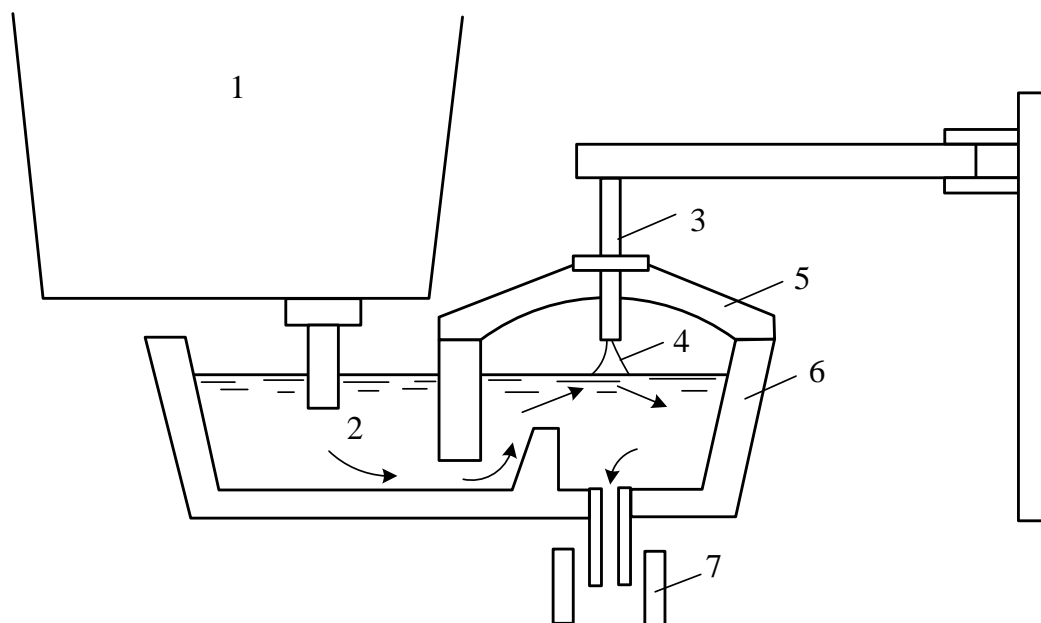


Рис. 5.15. Общий вид установки плазменного нагрева на промежуточном ковше: 1 – разливочный ковш; 2 – поток жидкой стали; 3 – плазмотрон; 4 – плазменная дуга; 5 – огнеупорная крышка; 6 – камера нагрева; 7 – кристаллизатор

С целью повышения эффективности использования плазменной установки для снижения степени ее использования оптимизировали весь температурный режим плавки и разливки, задействовали теплоизоляционную смесь в промежуточном ковше, позволяющую снизить потери температуры с 0,20 до 0,12 °С/мин. Кроме того, совместно с IRSID реконструировали промежуточный ковш, чтобы ускорить поступление

стали от места подогрева к каждому из четырех ручьев, а также крышку ковша и заменили ее материал для уменьшения расхода огнеупоров.

Был принят следующий режим работы установки:

- электрическая мощность дуги ниже 350 кВт (максимальная мощность 700 кВт) во избежание поджога огнеупоров;

- при этих условиях термический коэффициент использования мощности составляет 62 %;

- низкий нагрев в течение всей разливки, позволяющий увеличить средний перегрев, тогда как высокий подвод мощности в конце разливки достаточен для контроля падения температуры;

- длина дуги 300 мм;

- напряжение на дуге 100 В;

- максимальная сила тока 7 кА;

- плазмообразующий газ – аргон;

- материал анода – медь с водяным охлаждением;

- материал катода – водоохлаждаемый сплав W-Re.

В настоящее время установка плазменного подогрева используется при разливке 15 % ковшей, при этом 94 % блюмов разливают при температуре ± 5 град. от заданной.

Позицию французских специалистов относительно использования плазменных горелок в промежуточных ковшах разделяют и российские специалисты, по мнению которых подогрев металла в промежуточном ковше МНЛЗ для улучшения качества непрерывно-литой заготовки целесообразен, если сортамент представлен сталями с высокой чувствительностью к условиям разливки: коррозионно-стойкими, высокопрочными с высоким содержанием углерода, шарикоподшипниковыми и др. Для данного сортамента благодаря стабилизации условий разливки количество брака при прокатке первого и последнего слябов снижается в несколько раз. Если на МНЛЗ отливают рядовой сортамент, основное внимание при оценке целесообразности внедрения систем подогрева металла в промежуточном ковше необходимо уделять учету экономии энергоресурсов и огнеупоров в сталеплавильном переделе.

Кроме названных по имеющимся сведениям в мире функционируют и другие установки плазменного подогрева стали в промежуточных ковшах (таблица 5.1).

При непрерывной разливке ультранизкоуглеродистой стали для ее подогрева в промежуточном ковше с целью предотвращения науглероживания обычно используют плазмотрон прямого действия с вольфрамовым катодом. Тем не менее, исходя из экономических соображений, на заводе фирмы «ВОН Edelstahl» в Зигене (Германия) решили перейти на дуговой нагрев стали с вдуванием через центральный канал полого

графитового катода плазмообразующего газа для стабилизации горения дуги. Для выяснения приемлемости этого способа нагрева металла исследовали науглероживание жидкой стали в промежуточном ковше при разных технологических условиях. Сталь на заводе выплавляют в 27-т дуговой печи сверхвысокой мощности, разливают на слитки и на двухручьевого МНЛЗ горизонтального типа на заготовки диаметром от 120 до 50 мм при серийности до пяти ковшей. Время разливки одного ковша в зависимости от диаметра получаемой заготовки от 70 до 100 мин.

Таблица 5.6

Характеристика работающих систем плазменно-дугового подогрева стали в промежуточном ковше (ПК) МНЛЗ

Фирма (город), страна	Род тока	Мощность, МВт	Вместимость ПК, т	Тип МНЛЗ
ВОН Edelstahl, ФРГ	Постоянный	0,4	6	Горизонтальная
Saarstahl, ФРГ	»	1,2	21	Блюмовая
KSM Deltaconje (Аоста), Италия	Переменный	1,8	9	»
Chapparalle Steel (Мидлтаун), США	Постоянный	1	15	Горизонтальная
First Missysipy (Холсопл), США	»	1	15	»
Graham Group, Австралия	»	0,5	14	
Hanjan Seemless Tube, Тайвань	»	0,8	15	»
Cobe Steel (Какогава), Япония	Переменный	2,4; 4,3	80	Слябовая
Nippon Kokan (Фукуяма)	Постоянный	1,1	17	»
То же (Кэйхин)	»	1,1×4	40-50	»
Nippon Steel (Хирохата)	»	1	14	»
То же (Нагоя)	»	2×2	40	»
Nucor Steel (Норфолк), США	»	1	15	Блюмовая

Вначале для нагрева стали в промежуточном ковше использовали плазмотрон прямого действия с вольфрамовым катодом. Предварительное опробование дугового нагрева металла с помощью полого графитового электрода с подачей плазмообразующего газа показало хорошие результаты. Поэтому было решено перейти на этот способ нагрева стали. Расположение устройств, входящих в систему нагрева, представлено на рисунке 5.16.

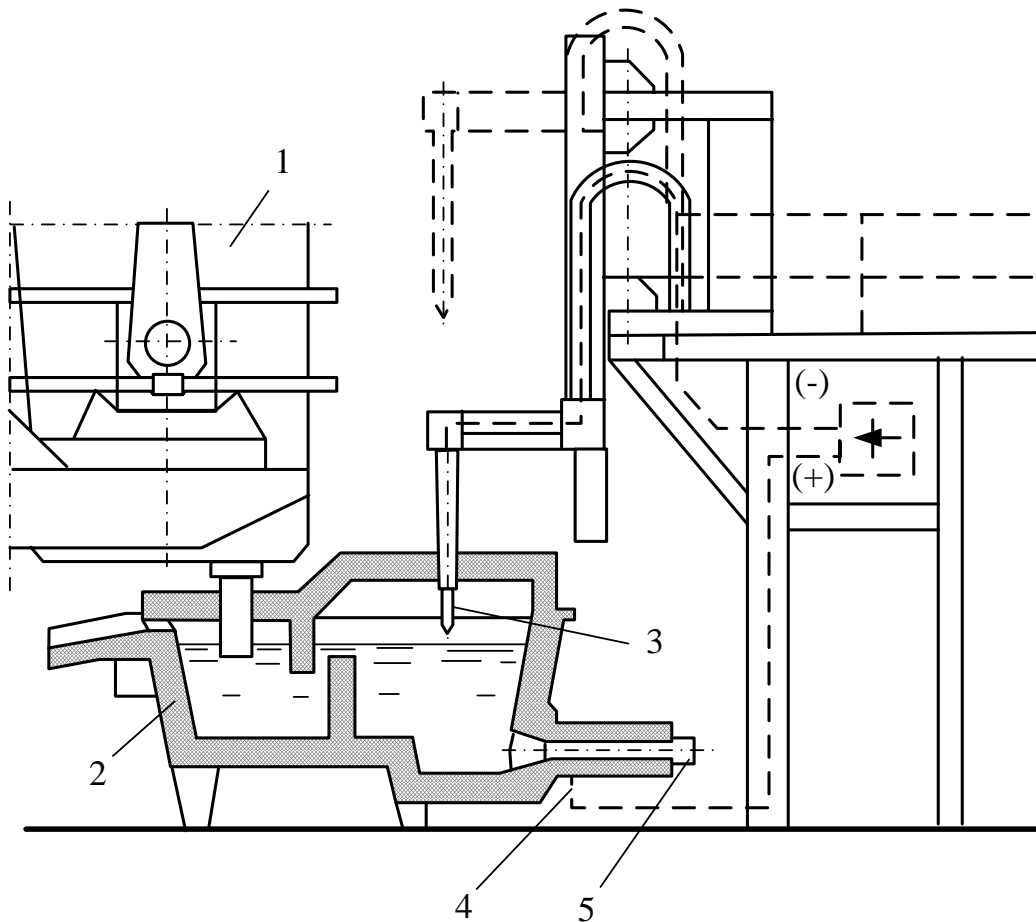


Рис. 5.16. Расположение устройств системы нагрева стали в промежуточном ковше: 1 – сталеразливочный ковш; 2 – промежуточный ковш; 3 – графитовый электрод-катод; 4 – подовый электрод-анод; 5 – ручей МНЛЗ

Электрод автоматически перемещается в соответствии с уровнем стали в ковше, например, при замене сталеразливочного ковша или при полном выпуске стали из промежуточного ковша.

Исследования проводили в течение полугода. Определяли расход графитовых электродов в рабочих условиях, измеряя длину электродов в начале и конце серийных разливок. Общее время нагрева составило

315 ч, было разлито 4770 т стали.

Первоначальный диаметр электрода составлял 100, а после нагрева стали диаметр рабочего конца был 37, длина обгоревшей части электрода – 600 мм. Выявлено, что боковой износ электрода значительно больше торцевого. Средний расход электродов составил 0,46 кг/ч в ходе нагрева металла в промежуточном ковше, или 0,030 кг/т жидкой стали. Боковой расход электрода был равен 0,42 кг/ч.

В течение указанного периода израсходовано 40 электродов. Общий расход графитовых электродов (включая поломки и остатки электродов) составил 1,87 кг/ч, или 0,124 кг/т.

Исследование науглероживания стали при ее нагреве в промежуточном ковше с использованием графитового электрода проведено в ходе 14 плавов с содержанием углерода в сталях 0,015 – 0,455 %. В среднем повышение содержания углерода в стали составило менее 0,001 %. При эксплуатации графитового электрода обеспечиваются более высокая готовность к работе, меньшие расходы на ремонт и более легкая работа с электродом, которую проводит обычный персонал.

В связи с тем, что графитовые электроды не охлаждаются водой, можно подводить меньше электроэнергии для обеспечения той же скорости нагрева с получением экономии электроэнергии. Дополнительное сокращение расходов связано в основном с меньшим расходом аргона и меньшими затратами на замену изношенных деталей. Всего эксплуатационные расходы были сокращены на 24 % – со 116 до 88 немецких марок в час. Можно ожидать дополнительную экономию в случае установки новых устройств нагрева, поскольку капитальные затраты на устройство с графитовым электродом мощностью 1 МВт ниже примерно на 30 %.

Но даже при условии подогрева металла в промежуточном ковше необходим периодический или постоянный замер температуры металла. Как отмечалось, этот прием часто совмещается с подогревом металла, но, тем не менее, на нем следует остановиться специально.

Фирма «Hereus Electronight» разработала систему для непрерывного измерения температуры, прошедшую испытания на заводе фирмы «British Steel» в Тиссайде.

Эта система состоит из Pt/Pt-Rh термопары, помещенной в трубку с внешней глиноземистографитовой футеровкой. Термопара погружается в сталь в промежуточном ковше около выходного отверстия для стали на глубину 510 мм. Спроектирована система с учетом возможности удаления термопары, срок службы которой около 20 ч в ходе одной серийной разливки или примерно такое же время при нескольких более коротких разливках. Точность измерения температуры сохраняется в

течение всего срока службы. Держатель термопары монтируется на системе подъема промежуточного ковша, имеет небольшую массу и простую конструкцию. Его можно удалить и заменить в ходе обычной разливки или в конце серийной разливки. Обеспечивается быстрое и легкое подсоединение кабеля, не требуется охлаждение. Сигнал термопары передается на пульт управления установкой непрерывной разливки. Преобразованный цифровой сигнал поступает в универсальную вычислительную машину, данные отображаются на дисплеях, так что операторы МНЛЗ, управления процессами кислородно-конвертерным и ковшового рафинирования получают данные о температуре стали в реальном масштабе времени.

Благодаря этому можно более точно регулировать температуру подаваемой стали в соответствии с реальным перегревом металла в ходе серийной непрерывной разливки. Уменьшилось количество бракованного металла и прорывов, что связано со своевременным предупреждением об уменьшении или увеличении перегрева стали в критические периоды: замены сталеразливочного ковша, изменения марки стали, замены промежуточного ковша в ходе разливки. Важна обратная связь с системой управления кислородно-конвертерным процессом и процессом рафинирования стали в ковше, при этом можно улучшить температурный режим стали в отдельных сталеразливочных ковшах в соответствии с реальной температурой стали в промежуточном ковше. Своевременное предупреждение позволяет вовремя сменить ковш, избежать намерзания металла и более точно рассчитать время разливки. Регулирование работы установки непрерывной разливки обеспечивает оптимальное затвердевание отливаемых слябов в зоне их мягкого обжата на правильном устройстве. Проблему более высокого перегрева можно решить введением в сталь в промежуточном ковше охлаждающей проволоки.

Оригинальное решение оборота промежуточного ковша без охлаждения при непрерывной разливке с повышением качества литых заготовок и готовой продукции и снижением издержек производства разработано фирмой «Kawasaki Steel». МНЛЗ № 4 в Мидзусиме для производства высококачественных непрерывнолитых слябов, главным образом для автомобильной отрасли, была запущена в эксплуатацию в 1994 г. В настоящее время месячная производительность МНЛЗ № 4 составляет 250 тыс. т при максимальной скорости разливки 2,5 м/мин. Одной из характерных особенностей процесса непрерывной разливки на этой МНЛЗ является горячая замена промежуточного ковша при его текущем ремонте, что способствует заметному снижению издержек на огнеупоры и уменьшению трудозатрат по замене огнеупорной футеровки промежу-

точного ковша при подготовке следующей разливки.

Ключевые технологии, которые обеспечивают успешный ход непрерывной разливки с горячей заменой промежуточного ковша при его текущем ремонте и достижение высокой стабильности качества слябов, могут быть сведены к следующим:

- разработка огнеупоров промежуточного ковша, которые могут выдержать длительные серии непрерывной разливки;

- ускоренная замена узла скользящего затвора на полу разливочного пролета;

- поддержание ремонтируемого промежуточного ковша в горячем состоянии с сохранением инертной атмосферы внутри ковша в течение периода ожидания следующей серии непрерывной разливки;

- попеременное использование двух промежуточных ковшей из-за кратковременного (примерно 12 мин) интервала с конца до начала следующей серии разливки, в связи с чем была разработана и осуществлена согласно схеме (рис. 5.17) технология горячей замены ремонтируемого промежуточного ковша при сохранении инертной атмосферы в ковше.

По окончании серии разливки промежуточный ковш отводится из позиции разливки в позицию ожидания, где используемый промежуточный ковш передается на тележку-опрокидыватель, которая перевозит его к позиции выпуска шлака, где промежуточный ковш наклоняют, чтобы слить оставшийся шлак. Эта операция проводится автоматически в течение примерно 4,5 мин. В той же самой наклонной позиции стакан скользящего затвора очищается кислородом, после чего его осматривают и, если необходимо, заменяют комплект подвижных плит скользящего затвора с помощью специальной тележки. После текущего ремонта промежуточный ковш поддерживается в горячем состоянии при сохранении в нем инертной среды с помощью газоструйного (N_2) нагревателя для минимизации вторичного окисления остатков металла за период до следующей серии непрерывной разливки.

В ходе описанных работ для разливки используется другой промежуточный ковш.

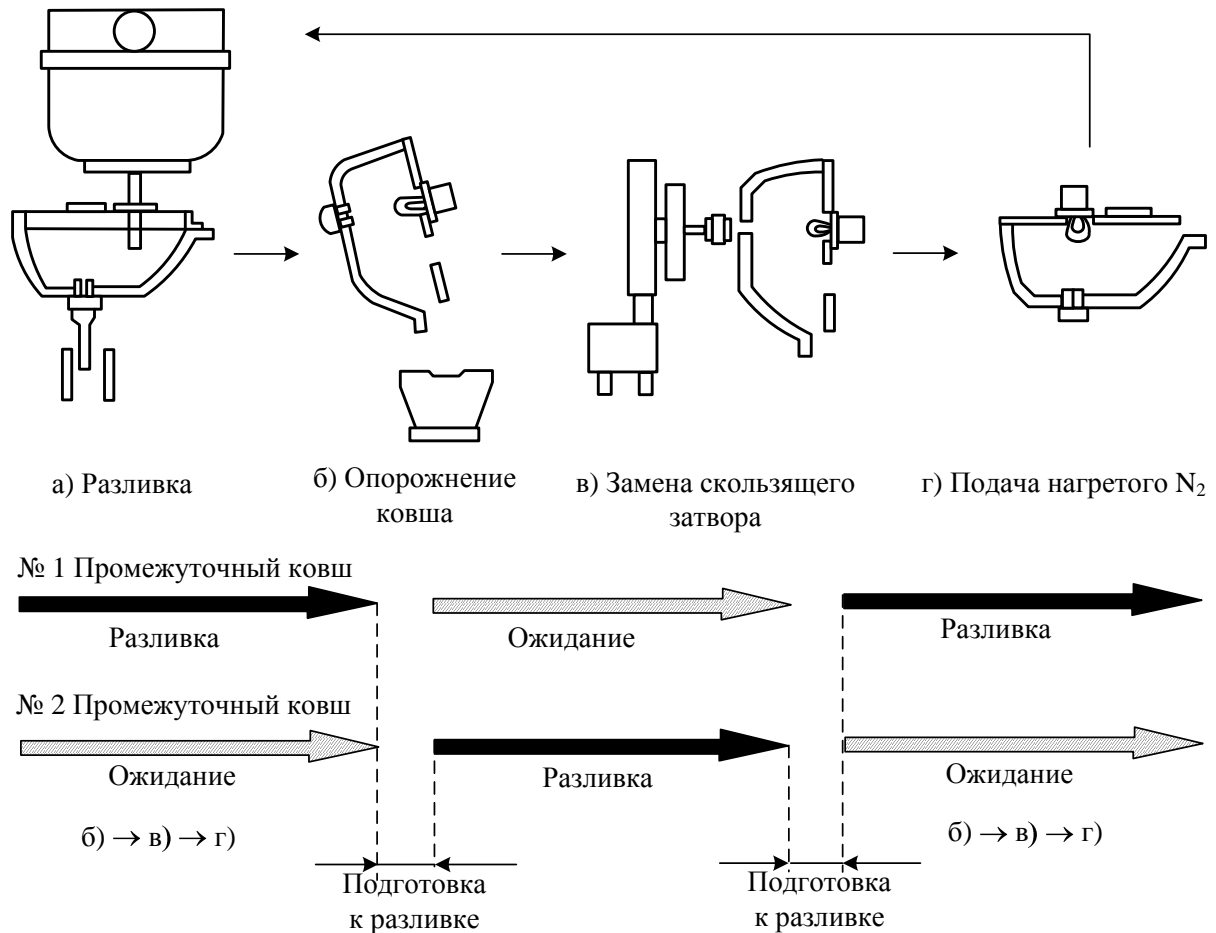


Рис. 5.17. Принципиальная схема непрерывной разливки при горячей замене ремонтируемого промежуточного ковша

Суммарное число плавов, разлитых с применением промежуточного ковша при повторном использовании последнего без какого-либо ремонта, составляет 400.

Суммарный срок службы огнеупорной футеровки промежуточного ковша от одной полной замены футеровки до следующей составляет 1500 плавов. Издержки на огнеупорную футеровку промежуточного ковша по сравнению с периодом запуска в эксплуатацию МНЛЗ № 4 уменьшились на 73 %. Для шлакового пояса, где огнеупорная футеровка имеет тенденцию разрушаться под воздействием эрозионной шлакообразующей смеси и шлака, применяли высокоглиноземистые, глиноземисто-карбидкремний-углеродистые ($Al_2O_3 - SiC - C$) и периклазоуглеродистые ($MgO - C$) огнеупоры.

Периклазоуглеродистые огнеупоры характеризуются максимальным сроком службы (износ 0,16 мм за плавку), высокоглиноземистые – минимальным (износ 1,0 мм за плавку).

Наиболее сильно изнашивалась часть крышки промежуточного ковша в зоне заливки стали, где огнеупорные бетоны разрушаются на глубину 5 – 10 мм наряду с адгезией выплесков на глубину 10 мм.

Полученные экспериментальные результаты указывают на следующий механизм разрушения:

- структурное растрескивание за счет адгезии выплесков и проникновения в огнеупоры;

- эрозия из-за выплесков окисленного металла.

В качестве защитных мер содержание Al_2O_3 увеличили до 75 % (вместо 55 %) и проволоки из коррозионностойкой стали до 2,5 % (вместо 2 %). В результате скорость износа снизилась до 0,16 мм за плавку, что обеспечило службу огнеупорной футеровки в течение не менее 460 плавков.

В новой системе предварительно собранный комплект из трех плит скользящего затвора может быть автоматически быстро заменен за одну технологическую стадию одним оператором.

Плотная посадка трех плит обеспечивается сжатием цилиндрических пружин от гидравлических цилиндров. Связь между верхним стаканом и плитой скользящего затвора гарантируется герметичным уплотнением из монолитных материалов (вместо мертеля).

С целью автоматизации почти всех операций, необходимых для замены скользящего затвора, на каждой «позиции замены» задействовали тележки для замены скользящего затвора с полностью автоматизированным устройством для монтажа/демонтажа старых и новых комплектов подвижных плит скользящего затвора, а также устройством для очистки канала сталеразливочного стакана.

Даже при наиболее оптимальном профиле промежуточного ковша не всегда достигается полная разгрузка промежуточного ковша, что приводит к постепенному накапливанию остатков, представляющих смесь металла и оксида алюминия Al_2O_3 , который плохо расплавляется в течение разливки.

Последнее самое трудное препятствие, которое надо было преодолеть для успешной горячей замены промежуточного ковша, заключалось в негативном влиянии на качество головного сляба вторичного окисления остатков в промежуточном ковше в течение периода ожидания.

Прежде качество головного сляба в серии разливки было наихудшим, и даже средние слябы первой плавки имели в четыре раза больше дефектов, чем слябы второй или последующей плавки.

При исследовании методом рентгеновского микроанализа дефектов (плен) на слябах первой плавки обнаружили, что дефекты наполо-

вину состоят из Al_2O_3 и на треть – из FeO . Это указывает, что пленки возникают в непрерывно-литых слябах из включений Al_2O_3 в приповерхностном слое и из небольших поверхностных трещин.

В течение периода ожидания оставшаяся настыль (шлак) в использованном промежуточном ковше в большей или меньшей степени окисляется. Жидкая сталь, заливаемая в промежуточный ковш, загрязняется окисленными остатками, особенно в первой плавке серии непрерывной разливки. Поэтому, чтобы устранить негативное влияние горячей замены промежуточного ковша на свойства слябов и сохранить инертную среду в промежуточном ковше, его подогревают потоком азота с расходом $2 \text{ м}^3/\text{мин}$ при высокой температуре.

Без подачи инертного газа содержание кислорода в промежуточном ковше начинает возрастать через 5 мин с начала периода ожидания, достигая 15 % через 40 мин. В отличие от этого подача инертного газа может стабильно сохранить содержание кислорода менее 2 %.

Однако подача инертного газа вызывает большее падение температуры огнеупоров промежуточного ковша. Через 5 ч разность в температуре огнеупоров промежуточного ковша в случае подачи инертного газа и обычного периода ожидания составляет около 150 град. Если период ожидания составляет более 400 мин, то температура поверхности огнеупорной футеровки промежуточного ковша становится менее $900 \text{ }^\circ\text{C}$. Следовательно, для плавного начала новой серии разливки требуется подогрев промежуточного ковша.

Было предложено новое нагревательное оборудование для сохранения достаточно инертной среды в промежуточном ковше, в частности, разработан газоструйный (N_2) нагреватель (рис. 5.18), отличающийся следующими характерными особенностями:

– подача в промежуточный ковш азота, нагретого до высокой температуры посредством аккумуляторов тепла, размещенных снаружи промежуточного ковша;

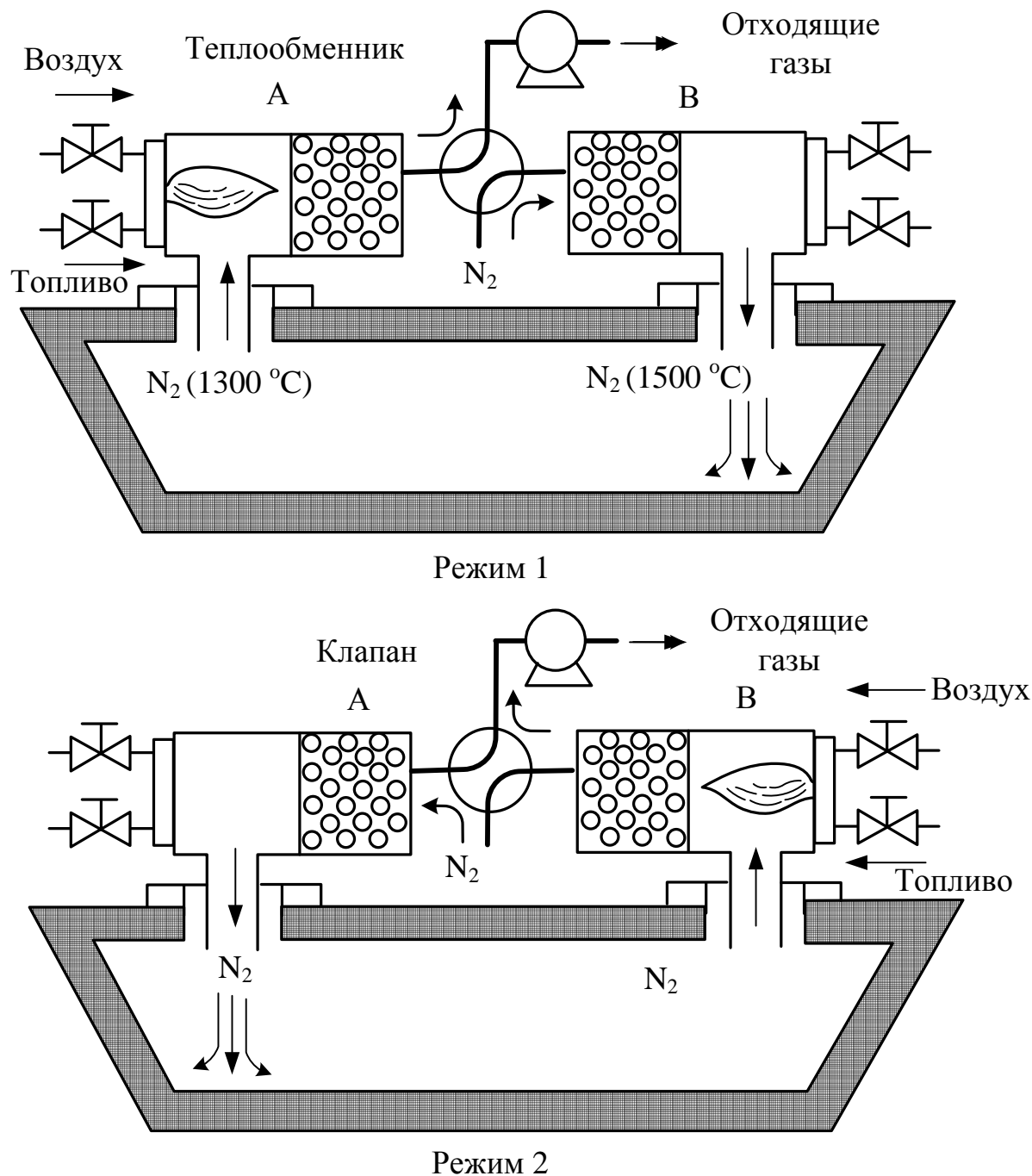


Рис. 5.18. Схема системы подгрева промежуточного ковша потоком горячего азота

– горячий азот попеременно подается из двух аккумуляторов тепла, что позволяет длительно поддерживать высокую температуру огнеупорной футеровки при сохранении инертной среды в промежуточном ковше;

– благодаря наличию в системе нагрева высокоэффективных теплообменников азоту может быть передано почти 100 % энергии горения

топливного газа.

Один из аккумуляторов нагревается и азотом, выходящим из промежуточного ковша, и за счет теплоты сжигания топливного газа. В то же время свежий азот вводится в другой аккумулятор тепла, а затем подается в промежуточный ковш после высокоэффективного теплообмена. Этот процесс теплообмена попеременно повторяется в двух аккумуляторах тепла с продолжительностью цикла 60 – 100 с.

Для оснащения двух теплообменников использовали действующую горелку промежуточного ковша. Температура азота, продуваемого через промежуточный ковш, может достигать 1500 °С при скорости подачи – 1000 м³/час.

Ниже приведены основные технические характеристики газоструйного (N₂) нагревателя:

Суммарная масса, т	2,8
Масса аккумулятора, т	0,3
Мощность горелки, МДж/ч	2500
Расход азота, м ³ /час	1200
Температура отсасываемого газа, °С	140
Температура подаваемого азота, °С	1500
Расход подаваемого азота, м ³ /ч	1000
Продолжительность цикла переключения, с	100

Согласно полученным данным среда в промежуточном ковше стабильно сохранялась инертной, содержание кислорода в ней не превышало 0,05 %.

Падение температуры огнеупорной футеровки промежуточного ковша существенно подавлялось. Поэтому даже через период ожидания продолжительностью 8 ч температура промежуточного ковша составляла не менее 1080 °С.

По сравнению с длительным периодом ожидания с подачей холодного инертного газа падение концентрации растворимого А1 в жидкой стали при использовании промежуточного ковша, оснащенного газоструйным (N₂) нагревателем, уменьшается на 40 %, тогда как повышение концентрации общего кислорода уменьшается на 50 %.

В кампании непрерывной разливки с применением промежуточного ковша, оснащенного газоструйным (N₂) нагревателем, поверхностные дефекты на первом и втором головных слябах в серии уменьшаются по сравнению с обычной непрерывной разливкой соответственно на 60 и 16 %.

Таким образом, есть основания полагать, что среди ряда ключевых технологий, позволяющих получить высокие эксплуатационные ре-

зультаты, наиболее значимый вклад с точки зрения гарантии качества вносит введение в действие газоструйного (N_2) нагревателя промежуточного ковша.

Аналогичный режим горячего оборота промежуточных ковшей разработан и с 1992 г. используется на МНЛЗ № 4 с промежуточным 80-т ковшом на заводе фирмы «Koba Steel».

Здесь также отказались от подогрева промежуточного ковша и все другие операции аналогичны описанным выше, кроме последней, при которой вместо вдувания в ковш подогретого азота для устранения окисления остатков металла в ковш вводят флюс, состоящий из 60 % CaO , 17 % MgO и 17 % CaF_2 . Этот флюс, расплавляясь, очищает футеровку ковша от остатков окисленного шлака предыдущей плавки, что приводит к уменьшению содержания оксидов железа в покровном шлаке промежуточного ковша, уменьшению окисления алюминия в стали и в конечном итоге к повышению ее чистоты по неметаллическим включениям.

На заводе фирмы POSCO (Корея) в комплект новой вертикальной с изгибом слябовой МНЛЗ включена несколько иная, более простая система оборота горячего промежуточного ковша (рис. 5.19).

Здесь после завершения разливки в горизонтальном положении с помощью манипулятора удаляется разливочный стакан, затем ковш поворачивается на 90 град. и из него сливаются остатки металла и шлак, после чего ковш в том же положении передается на стенд для осмотра, очистки и, если необходимо, замены скользящего затвора. По завершении этих операций ковш поворачивается в горизонтальную позицию, в которой с помощью автоматического манипулятора устанавливается новый погружной стакан, и ковш подается на разливку.

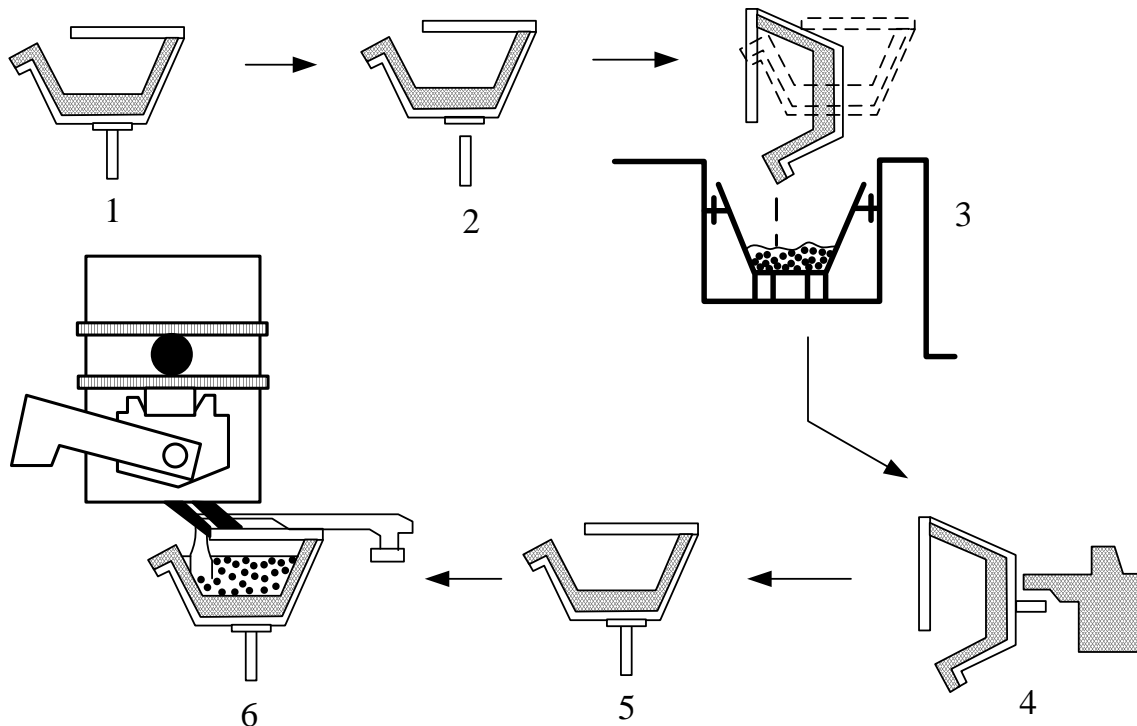


Рис. 5.19. Технология горячего оборота промежуточного ковша:
 1 – конец предыдущей разливки; 2 – удаление погружного стакана с помощью манипулятора; 3 – поворот ковша; слив остатков металла и шлака; очистка ковша;
 4 – многофункциональный манипулятор для обслуживания участка скользящего затвора; 5 – установка нового погружного стакана с помощью манипулятора;
 6 – начало новой разливки

5.4. Флотация и фильтрация неметаллических включений в промковшах

Инженерные решения последних лет позволили добиться заметных успехов в решении важнейшей для качества стали проблемы рафинирования от неметаллических включений. Проблема рафинирования металла от включений традиционно решалась путем рациональной организации процессов, связанных с образованием включений (раскисление, десульфурация), и процессов, обеспечивающих абсорбцию образующихся включений шлаком. Широкое внедрение методов продувки металла инертным газом позволило организовать *флотацию включений*.

Метод *фильтрации включений* вначале получил распространение при производстве отливок ответственного назначения из высоколегированных сталей, особенно в случаях, когда сталь обрабатывается высокоактивными реагентами. Так, например, при использовании фильтров из гранул-окатышей CeO_2 , размещенных в разливочной воронке, была повышена ударная вязкость при минус $50\text{ }^\circ\text{C}$ стали 20Л, обработанной РЗМ, на 30 – 50 %. Использование керамических фильтров (зачастую

совместно с продувкой аргоном) позволило решать такие проблемы в комплексе с одновременным использованием фильтрации. В то время как при флотации легче и быстрее удаляются более крупные (или легкоукрупняющиеся) включения, метод фильтрации оказывается очень эффективным для удаления мелких включений, которые с трудом отделяются в процессе флотации.

В настоящее время комплексное использование методов флотации и фильтрации включений постепенно становится повсеместной практикой.

Газовые пузыри, проходящие через ванну, при продувке металла инертным газом способствуют флотации включения. Поверхностное натяжение $\sigma_{\text{вкл-газ}}$ меньше адгезии включения к металлу $\sigma_{\text{м-газ}}$. В результате того что $\sigma_{\text{вкл-газ}} < \sigma_{\text{м-газ}}$, включение будет «прилипнуть» к пузырю газа и уноситься с ним в шлак. Приходится учитывать, однако, что эффективность флотации включений путем газовой «промывки» через дно промежуточного ковша бывает невысока ввиду слияния пузырей в непрерывную струю и соответственного уменьшения поверхности контакта газ-металл. В то же время чрезвычайно интенсивное перемешивание может вызвать разобшение, разрушение образовавшихся ранее скоплений, конгломератов включений и тем самым ухудшить процесс их удаления. При чрезмерно интенсивном перемешивании ванны в металл могут «затягиваться» частички шлака; при этом содержание включений не уменьшается, а увеличивается. Кроме того, может иметь место ускорение процесса эрозии огнеупоров; соответственно возрастает содержание в металле также и экзогенных включений. На практике для каждого конкретного случая существует оптимальная интенсивность перемешивания, при которой обеспечивается всплывание включений. В этих случаях эффективность флотации проявляется очень четко. Так, например, применение вращающейся фурмы для подачи инертного газа в металл в промежуточном ковше создает более равномерное распределение по объему ванны очень мелких пузырей, которые эффективно удаляют включения (рис. 5.20).

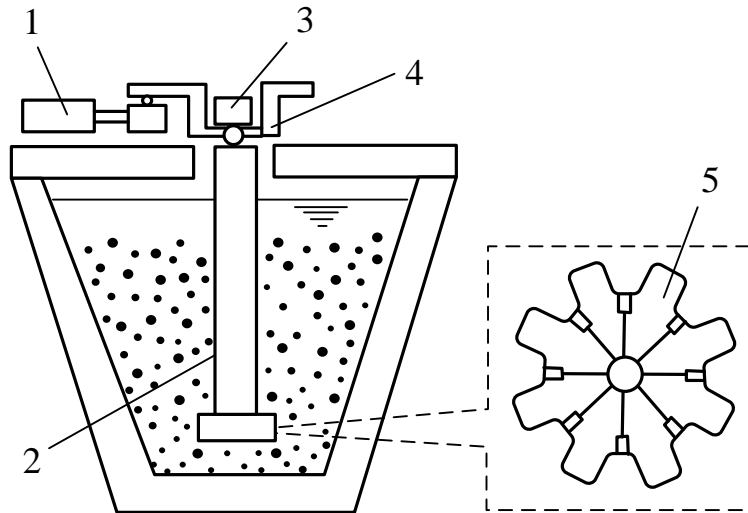


Рис. 5.20. Схема вращающейся фурмы для создания микропузырей, усиливающих отделение включений: 1 – двигатель; 2 – фурма; 3 – привод; 4 – вращающееся соединение; 5 – пористая пробка

Путем сравнения результатов, полученных при обычной продувке снизу и при использовании вращающейся фурмы, при обработке низкоуглеродистой раскисленной стали было установлено, что количество включений размером менее 50 мкм при использовании вращающейся фурмы было значительно снижено. Это проявилось также в существенном уменьшении количества внутренних и поверхностных дефектов. Помимо отмеченного важно организовать технологию так, чтобы всплывающее включение в момент соприкосновения со шлаком успело им ассимилироваться прежде, чем нисходящие потоки металла увлекут его опять вниз. Скорость «захватывания» шлаком включения зависит от многих факторов, в том числе от межфазного натяжения на границе шлак-включение $\sigma_{\text{ш-газ}}$. Чем меньше эта величина, т. е. чем лучше смачиваемость включения шлаком, тем легче идет процесс ассимиляции включений шлаком. Таким образом, чем больше $\sigma_{\text{м-газ}}$, тем легче включение отделяется от металла, и чем меньше величина $\sigma_{\text{ш-газ}}$, тем легче включение ассимилируется шлаком. Скорость удаления включений из металла в шлак зависит также от площади поверхности контакта (отношения поверхности шлак-металл к массе металла), степени перемешивания ванны, физических свойств шлака и др. В случае же фильтрации металла от неметаллических включений жидкий металл контактирует с твердыми поверхностями керамических перегородок, фильтров и т. п. Условия выделения включений из металла при этом существенно изменяются. Если при гомогенном зарождении новой фазы радиусом r увеличение свободной энергии определяется как $\Delta G' = S' \sigma = 4\pi r \sigma_{\text{вкл-м}}$ (где S'

– поверхность раздела металл–включение), то при зарождении включений на готовой поверхности

$$\Delta G''_{\text{пов}} = S'\sigma + S''\sigma = S''\sigma_{\text{м-вкл}} + S''(\sigma_{\text{пов-вкл}} - \sigma_{\text{пов-м}}) \quad (5.1)$$

где S' – площадь раздела металл-включение;

S'' – площадь готовой поверхности, т.е. подложки, на которой выделяется включение;

$\sigma_{\text{м-вкл}}$, $\sigma_{\text{пов-вкл}}$, $\sigma_{\text{пов-м}}$ – межфазные натяжения на границе металл-включение, включение-готовая поверхность и металл-готовая поверхность.

Межфазное натяжение $\sigma_{\text{пов-м}}$ на границе металла с готовой поверхностью обычно выше межфазного натяжения $\sigma_{\text{пов-вкл}}$ на границе включения с готовой поверхностью (обычно оксидной частицей), т.е. $\sigma_{\text{пов-вкл}} < \sigma_{\text{пов-м}}$, поэтому выражение $S''(\sigma_{\text{пов-вкл}} - \sigma_{\text{пов-м}})$ отрицательно, и в целом $\Delta G''_{\text{пов}} < \Delta G'$, т. е. при прочих равных условиях образование зародышей на готовой поверхности энергетически более вероятно. Чем меньше угол смачивания θ (рис. 5.21), тем благоприятнее условия для выделения новой фазы, тем меньше пересыщения требуется. На это замечание следует обратить внимание. Смысл его состоит в следующем. При гомогенном зарождении велика роль межфазного натяжения $\sigma_{\text{м-вкл}}$, поэтому преимущественно выделяются включения, хорошо смачиваемые металлом (типа FeO, MnO). В случае гетерогенного зарождения (при наличии готовых поверхностей) преимущественно могут выделяться вещества, имеющие небольшие значения межфазного натяжения (капиллярно-активные) на границе с данной готовой поверхностью, вещества, имеющие более близкое ориентационное соответствие к имеющейся подложке (например, Al₂O₃).

Считается, что концентрация взвеси в жидкой стали может составлять $10^6 - 10^8$ частиц/см³. Чем меньше степень пересыщения, тем выше роль готовых поверхностей.

Таким образом, флотация и фильтрация включений при обработке металла в промежуточном ковше определяются рядом одновременно действующих факторов; 1) размерами включений, их составом (и температурой плавления) и плотностью; 2) способностью включений к укрупнению; 3) межфазным натяжением на границах металл-включение и шлак-включение; 4) интенсивностью перемешивания ванны и характером движения металла; 5) физическими характеристиками металла и шлака (состав, температура, вязкость); 6) физическими характеристиками и составом контактирующей с перемешиваемым металлом твердой поверхности футеровки ковша, перегородок, фильтровальных отверстий и т. д.

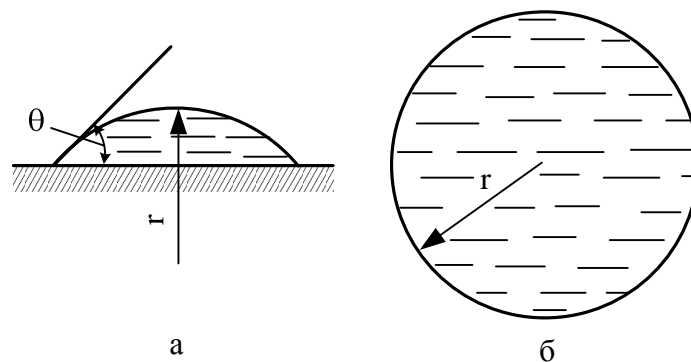


Рис. 5.21. Схема выделения зародыша критического радиуса на готовой поверхности (а) и в объеме расплава (б)

Руководствуясь общими соображениями, в каждом конкретном случае на практике определяют рациональные способы снижения содержания включений, а также перевода включений в такое состояние, при котором их вредное влияние на свойства металла было бы минимальным.

Расширение масштабов использования методов флотации и фильтрации стали происходило параллельно расширению масштабов непрерывной разливки стали. В начале 80-х годов минувшего века при строительстве новых и реконструкции действующих МНЛЗ все в большей мере стали внедрять новые методы внепечной обработки стали. В промежуточных ковшах повсеместно начинают устанавливать перегородки, обеспечивающие лучшее рафинирование металла от неметаллических включений.

Исследованиями установлено, что содержание неметаллических включений в металле уменьшается, если сталь разливать через промежуточный ковш с перегородкой, и включений остается еще меньше, если использовать промежуточный ковш с двумя перегородками. Исследования механических свойств готового проката показали аналогичное распределение результатов в зависимости от числа перегородок в промежуточном ковше. Полученные сведения о влиянии конструкции и вместимости промежуточного ковша на качество готовой стали привели к существенным изменениям на производстве.

В качестве примера можно привести конструкцию промежуточного ковша на одном из японских заводов. В ковше установили достигающие дна перфорированные перегородки из огнеупора, содержащего 65 % Al_2O_3 . Подбором оптимального числа и размеров отверстий в перегородках удалось ускорить всплытие неметаллических включений. Над удлиненным сталеразливочным стаканом в промежуточном ковше устанавливают достигающую дна трубу с отверстиями, предназначен-

ную для улавливания включений Al_3O_3 и предотвращения зарастания стакана. На другом заводе в промежуточном ковше был оборудован ряд перегородок, часть которых имела сквозные горизонтальные каналы. На участке промежуточного ковша под зоной подачи металла из разливочного ковша были оборудованы пористые пробки для продувки металла аргоном снизу. Сверху промежуточный ковш закрывали крышкой с тщательным уплотнением всех соединений. Металл из разливочного ковша подавали через удлиненный стакан с аргоновым уплотнением. В результате не только не происходило обычно наблюдаемого увеличения содержания азота в металле, но и, напротив, был обнаружен эффект деазотирования.

В связи с расширяющейся практикой использования для рафинирования металла в промежуточных ковшах МНЛЗ различных устройств для фильтрации включений возникла проблема определения основных требований к материалу фильтров и их классификации. В частности, фильтрационные процессы в промежуточных ковшах предлагается разделить на три типа (рис. 5.22):

I – метод «сита» – экранирование или фильтрация фильтрующим материалом (механически задерживаются крупные частицы). Такой тип фильтрации очень эффективен в случае, если необходимо удалить из металла крупные включения;

II – метод «пирога» – фильтрация с образованием на поверхности фильтра твердого осадка («пирога»). При этом типе на входной поверхности фильтра оседают твердые частицы, и в дальнейшем фильтрация осуществляется через слой ранее осажденных частиц. По мере протекания процесса фильтрации слой становится толще, и для поддержания постоянного расхода жидкости необходимо увеличивать металлостатическое давление;

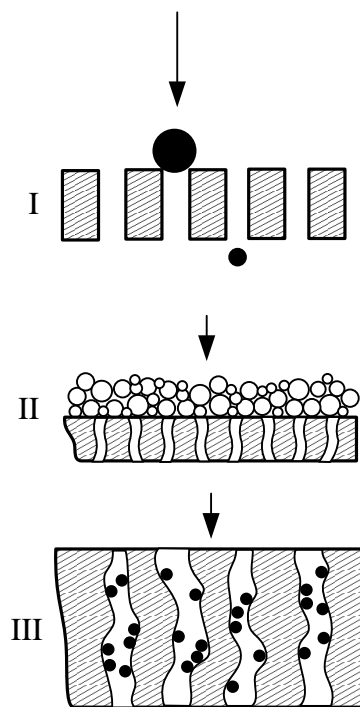


Рис. 5.22. Основные типы организации флотационных процессов (I – III) для рафинирования стали от включений

III – глубинная фильтрация, или фильтрация в толще фильтра. Этот способ обеспечивает задержку частиц очень малого размера, меньшего, чем отверстия пор фильтра. В этом случае должны быть реализованы механизмы, обеспечивающие транспортировку частиц к поверхности фильтра и закрепление их на фильтрующей поверхности. При этом следует иметь в виду, что частицы неметаллических включений могут быть как в твердом, так и в жидком состоянии, поэтому тип фильтра III является предпочтительным. В связи с этим материалы, используемые для изготовления фильтров, должны: 1) противостоять термическим и механическим напряжениям, возникающим до и в процессе фильтрации; 2) не разрушаться при взаимодействии металл-шлак-фильтр в процессе разливки; 3) эффективно удалять нежелательные включения и одновременно не представлять избыточного сопротивления для потока жидкого металла; 4) не охлаждать жидкую сталь. В общем случае процесс складывается из двух стадий: первоначальный поток металла частично затвердевает при контакте с фильтром, а затем этот затвердевший металл сноса расплавляется при прохождении следующих порций жидкого металла.

Технологии изготовления фильтров и их строение различны. Широкое распространение получили так называемые керамические порис-

тые фильтры (КПФ) или *пеночерамические* фильтры (ПКФ). Такие фильтры (пористость до 90 %, размер пор 0,5 – 5,0 мм) обладают комплексом свойств, необходимых для фильтрации чугуна, стали и высокотемпературных материалов или сплавов: малой массой, высокоэффективной поверхностью; обеспечивают извилистый путь потока металла, низкие потери давления; обладают приемлемыми термо- и механическими свойствами. Благодаря своей структуре они могут задерживать включения микронных размеров.

В 1992 г. журнал «Сталь» в одном из своих выпусков (№ 4) поместил тематическую подборку материалов о накопленном отечественном опыте по данной проблеме.

В таблице 5.2 приведены некоторые характеристики ПКФ по зарубежным данным.

Таблица 5.7

Основные характеристики пенообразующих керамических материалов

Характеристика	Материал ПКФ				
	Al ₃ O ₃ + фосфаты алюминия	муллит (3Al ₃ O ₃ · 2SiO ₂)	спеченный оксид алюминия (99 % Al ₃ O ₃)	стабилизированный диоксид циркония ZnO ₂ + CaO (или MgO, или Y ₂ O ₃)	65 % стабилизированного ZrO ₂ + 35 % Al ₃ O ₃
Максимальная температура применения, °С	1427	1538	1 649	1760	1704
Термостойкость	Очень высокая			Высокая	Очень высокая
Фильтрация расплавов	Алюминиевых и других цветных сплавов	Цветных металлов, чугуна, сплавов на никелевой основе	Черных металлов, специальных чугунов	Специальных сплавов, стали	Стали

В настоящее время обеспечивающие осаждение неметаллических включений пористые фильтры, устанавливаемые в поперечных перегородках, которые отделяют зону подвода металла от зоны выпуска в промежуточных ковшах УН РС, изготавливают серийно. Например, одна из фирм выпускает фильтры трех типов с размерами ячеек 10, 15 и 25 меш, что соответствует изменению среднего размера просветов в пределах от 400 до 1700, 1100 и 900 мкм соответственно. Проведенные эксперименты показали, что при разливке на шестиручьевой МНЛЗ среднее число включений при установке с фильтрами снижается в 4 раза. В числе «задержанных» при фильтрации включений прежде всего отмечены нитриды титана, алюминаты кальция, силикаты марганца и глинозем. Проблема выбора огнеупорного материала для изготовления устанавливаемых в промежуточном ковше перегородок с фильтрующими отверстиями не может считаться решенной, и исследования в этом направлении продолжаются.

На заводе одной из японских фирм для рафинирования низкоуглеродистых сталей, раскисленных алюминием и титаном, опробована перегородка из СаО, представляющая собой конструкцию толщиной 200 мм, собранную из двух пластин по 100 мм. В перегородке выполнены отверстия, сужающиеся в направлении движения металла от диаметра 50 мм до диаметра 40 мм. Зафиксировано снижение загрязненности стали как крупными (более 5 мкм), так и мелкими (менее 5 мкм) включениями. Исследователи пришли к выводу, что рафинирование металла от Al_2O_3 происходит в результате образования легкоплавкого соединения $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ (его обнаружили методом дифракции рентгеновских лучей).

На другом заводе исследовали иной способ решения проблемы. На пути движения металла из огнеупоров были установлены своеобразные «ворота» (рис. 5.23), замедляющие движение металла, а в днище ковша за «воротами» – пористая пробка, через которую в пузырьковом режиме подавали аргон таким образом, чтобы весь металл проходил через барботируемый слой. Эксперименты проводили в 25-т промежуточном ковше, скорость разливки составляла 0,8 – 1,2 м/мин, отношение ($a/W \cong 0,668$). Установлено, что в случае продувки аргоном общее содержание кислорода стабильно снижается, уменьшается содержание включений, повышаются механические свойства готового металла.

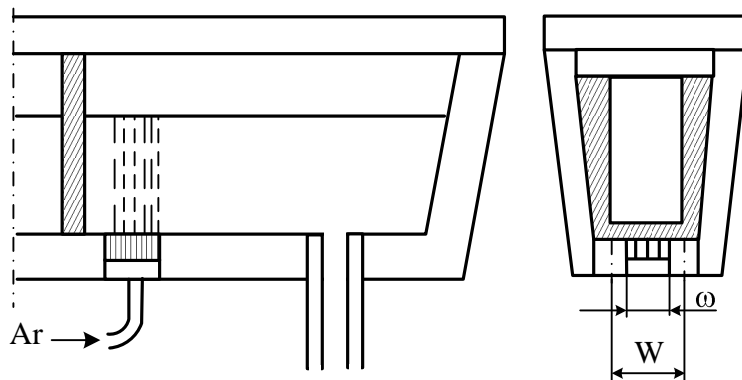


Рис. 5.23. Конструкция промежуточного ковша с «воротами»

На рис. 5.24 представлен пример технологического решения по использованию промежуточного ковша на установке для отливки непрерывнолитых заготовок блюмового типа размером 380×550 мм. Установка пущена на заводе фирмы Kobe Steel, г. Какогава (Япония). В Т-образном ковше вместимостью 35 т глубина ванны металла достигает 900 мм. С целью лучшей организации удаления в процессе разливки включений помимо увеличения глубины ванны и скорости разливки до 0,6 м/мин металл фильтруется, проходя через отверстия в двух перегородках. Установка включает устройства для защиты струи аргоном, крышку, закрывающую промежуточный ковш, систему подачи аргона в погружаемое в кристаллизатор сопло и др. Исследованием установлено, что общее содержание кислорода в стали в результате фильтрации снижается более чем в 2 раза, достигая значений примерно $20 \cdot 10^{-4} \%$.

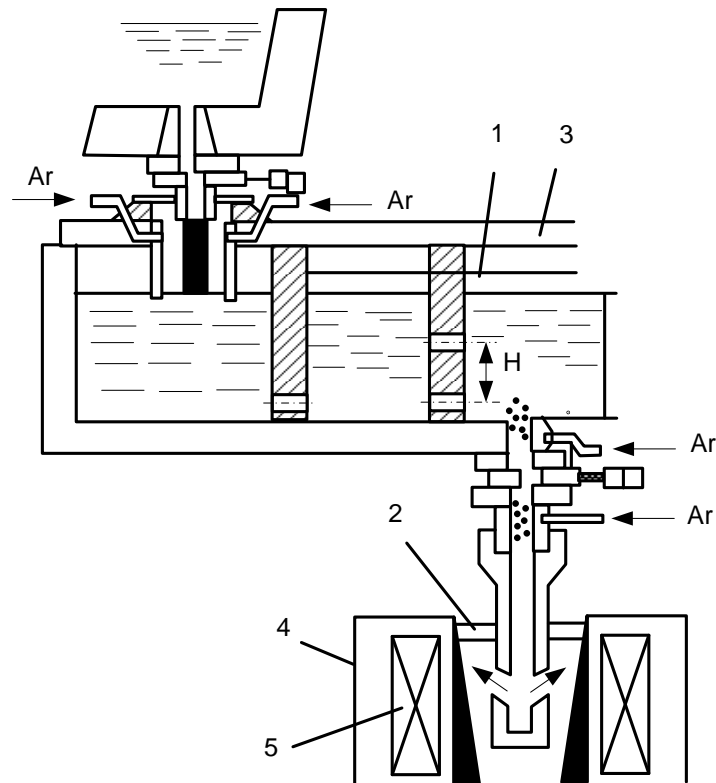


Рис. 5.24. Конструкция промежуточного ковша блюмовой УНПС завода Kobe Steel в г. Какогава (Япония): 1 – покровный порошок в промежуточном ковше; 2 – покровный порошок в кристаллизаторе; 3 – крышка ковша; 4 – кристаллизатор; 5 – устройство для электромагнитного перемешивания

Помимо рафинирования стали от неметаллических включений фильтрация через огнеупорные фильтры может дать еще один положительный результат. Специальными исследованиями установлено, что в процессе плавки стали некоторые примеси цветных металлов частично мигрируют из стальной ванны в футеровку. Если это так, то можно ожидать, что в процессе фильтрации стального расплава через огнеупорные фильтры будет иметь место хотя бы частичное рафинирование стали также и от примесей некоторых цветных металлов (они останутся в порах и каналах фильтра).

Глава 6. Погружные стаканы

6.1. Выбор химического состава стаканов

Погружные стаканы обеспечивают наиболее эффективную защиту струи металла, поступающего из промежуточного ковша в кристаллизатор. Погружные стаканы относятся к наиболее ответственным огнеупорным изделиям для непрерывной разливки, поэтому к ним предъявляются повышенные требования по термостойкости, механической прочности, стойкости к абразивному износу и шлакоустойчивости. Кроме того, эти изделия должны быть минимально склонны к зарастанию канала неметаллическими включениями.

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

При изготовлении стаканов из глиноземоуглеродистого материала особое внимание уделяют повышению термостойкости, поэтому обычно в качестве заполнителя с малым термическим расширением добавляют несколько десятков процентов плавленного кварца. Однако при разливке качественных сталей высокой чистоты кремнезем считают нежелательным компонентом, поэтому в таких случаях используют низкокремнеземистый или бескремнеземистый материалы с высокой коррозионной стойкостью, а для обеспечения термостойкости увеличивают содержание графита.

Износ погружных стаканов на участке контакта со шлакообразующей смесью в кристаллизаторе – одна из главных причин, ограничивающих срок службы стакана. Обычно для этого участка, называемого шлаковым поясом, применяют огнеупорный материал на основе диоксида циркония и углерода. Диоксид циркония в сравнении с глиноземографитовым материалом имеет в несколько раз большую шлакоустойчивость. Большое внимание уделяется подбору цирконового сырья, менее склонного к разложению при взаимодействии со шлакообразующей смесью, и углеродистого сырья, стойкого к растворению в жидкой стали. Кроме того, фирмой «Krosaki» (Япония) разработан безоксидный заполнитель ZrB_2-C (графит, 13 %), коррозионная стойкость которого вдвое выше, чем бадделеитографитового (ZrO_2-C) огнеупорного материала.

Влияние содержания фтора в шлакообразующей смеси на износ шлакового пояса погружного стакана оценили специалисты фирмы «Nippon Steel» (Япония). Они приготовили шлакообразующую смесь одинаковой вязкости и плавкости с содержанием фтора 8 и 5 % и провели коррозионные испытания с погружением огнеупора. Установлено, что смесь с пониженным содержанием фтора оказывает меньшее (на 30 %) коррозионное воздействие на шлаковый пояс погружного стакана.

В последние годы серьезную проблему представляет зарастание стаканов; на ее решение направлены многочисленные разработки. Причина зарастания стаканов – отложение на стенках канала включений, которые образуются в результате окисления введенного в сталь раскислителя и представляют смесь глинозема и оксидов железа. Наибольшая склонность к зарастанию проявляется при разливке низкоуглеродистых сталей, раскисленных алюминием.

Разработаны и применяются меры по снижению зарастания стаканов, среди которых наибольшее распространение получили применение огнеупорных материалов, устойчивых к образованию глиноземистых отложений, и совершенствование конструкций (подача аргона в канал и др., рассматриваемые ниже). Среди материалов, стойких к образованию отложений, наиболее известен огнеупорный материал состава ZrO_2 -CaO-C. В углеродсодержащем цирконоизвестковом материале используется специфическое сырье – цирконат кальция $CaO-ZrO_2$, стойкий к гидратации и обладающий малым термическим расширением. В сравнении с прежними глиноземографитовыми стаканами из ZrO_2 -CaO-C в промышленных условиях гораздо меньше подвержены налипанию глиноземистых включений.

Примером разработки, направленной на ограничение образования Al_2O_3 в результате уменьшения подвода кислорода из огнеупорного материала, может служить бескремнистый низкоуглеродистый материал. В нем содержание углерода не превышает 5 %, а кремнезем полностью отсутствует, поэтому практически исключено поступление кислорода в результате восстановления оксидов и существенно ограничено образование Al_2O_3 .

Имеется также сообщение о создании безуглеродистого погружного стакана, в котором глиноземистые отложения предотвращаются за счет ограничения образования газообразного CO с окислительными свойствами. Погружные стаканы с безуглеродистой поверхностью канала (CFL – carbon free lining) производства бельгийской фирмы «Vesuvius» испытаны на МНЛЗ завода фирмы «Kawasaki Steel» в Мидзусиме. Площадь сечения выходного отверстия стакана CFL оказалась на 43 % больше, чем у стандартного, и в вертикальном канале отсутствовала ме-

таллическая настыль, толщина которой обычно составляла 5 – 10 мм.

При разработке нового материала без углерода и кремния, стойкого к отложению глинозема, специалисты японской фирмы ТУК пришли к выводу, что наилучшим материалом является шпинель, обладающая слабой химической активностью в контакте с оксидом алюминия и к тому же сохраняющая гладкую поверхность. В условиях разливки испытали глиноземографитовый огнеупор (66,4 % Al_2O_3 , 28,6 % С, более 4,4 % SiC) и безуглеродистый бескремнеземистый шпинельный материал (76 % Al_2O_3 , 23 % MgO). В глиноземографитовом стакане обнаружили отложение глинозема толщиной 20 мм, в изделии со шпинельным слоем на стенке канала глиноземистые отложения полностью отсутствовали, что подтверждает преимущества шпинельного материала.

Значительный эффект предотвращения зарастания дает продувка аргоном стакана с щелевым каналом для подвода газа. Эта конструкция получила самое широкое распространение. В стакане с щелевым газовым каналом в качестве материала пористой вставки прежде использовали кремнеземсодержащий глиноземографитовый огнеупор. Однако из-за восстановления SiO_2 в огнеупоре характеристика газопроницаемости дестабилизируется. Для преодоления этого недостатка разработан бескремнеземистый материал, который обеспечивает длительную стабильную продувку стакана газом.

Разработан погружной стакан с теплоизолированным щелевым газовым каналом. Здесь в газовую полость помещен теплоизоляционный материал с целью предотвращения кристаллизации стали в стакане. Это дает эффект предупреждения зарастания стакана в особенности в начальный период разливки и во время смены сталеразливочного ковша. Поверхность стакана с теплоизолированным газовым каналом имеет пониженную температуру, что означает меньшие потери тепла.

Погружной стакан со ступенчатым каналом турбулизирует поток стали и тем самым предотвращает эксцентриситет потока и неравномерное истечение. При использовании такого стакана с газовой продувкой аргон интенсивно перемешивается со сталью на ступенчатом участке, равномерно распределяется по всей поверхности канала и усиливает эффект предотвращения глиноземистых отложений.

На Боровичевском комбинате огнеупоров освоено производство трехслойных прямоточных графитсодержащих погружных стаканов. Корундографитовая основа открытой пористостью не менее 18 % содержит 70 % Al_2O_3 и 25 – 26 % С. Шлаковый пояс выполнен из материала системы ZrO_2 -С (70 % ZrO_2 , 13 – 14 % С, открытая пористость 21 %). Для предотвращения затягивания канала стакана внутренняя поверхность канала изготовлена из материала на основе цирконата каль-

ция (50 % ZrO_2 , 17 % C, 21 – 25 % CaO, открытая пористость 16 – 20 %).

Промышленные испытания трехслойных погружных стаканов, проведенные на МНЛЗ ОАО «ОЭМК» при разливке стали широкого марочного сортамента, дали следующие результаты:

- время эксплуатации до 7 ч разливки;
- удельный износ огнеупоров шлакового пояса составил 1,2 – 1,6 мм/ч разливки (аналогичные показатели стакана целиком из корундографита – 4 – 5,2 мм/ч разливки);
- достигнут эффект замедления процесса затягивания канала стакана глиноземистыми включениями, и через 6 – 7 ч разливки канал стакана не требовал прожигания.

6.2. Специальные мероприятия по предотвращению зарастания стаканов

На блюмовой МНЛЗ в Фукуяме обнаружили, что при стопорной разливке интенсивное отложение глинозема происходит в зоне сопряжения стопора и погружного стакана. В целях уменьшения этого отложения в зазоре между стопором и стаканом при разливке низкоуглеродистой стали, раскисленной алюминием, провели испытания с измененной схемой продувки стакана аргоном и иным, чем прежде, материалом головки стопора. Скорость разливки в блюмы сечением 250×430 мм низкоуглеродистых, раскисленных алюминием сталей составляла 0,9 м/мин.

Интенсивность отложения глинозема оценивали по относительной величине подъема стопора в процессе разливки. Вместо прежнего способа подвода аргона через щелевой канал применили подачу через пористую вставку. Провели четыре испытания стаканов с разным расположением пористой вставки (рис. 6.1).

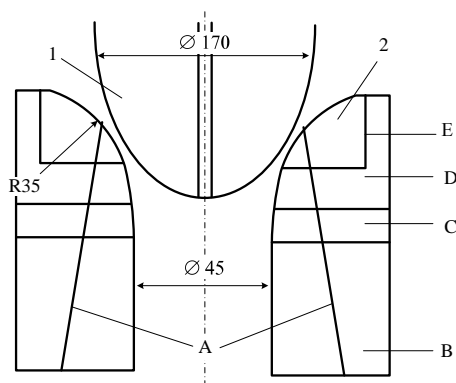


Рис. 6.1. Зона сопряжения стопора (1) и погружного стакана (2) с обычным щелевым каналом (А) для подвода аргона и с пористыми вставками разного типа (В–Е)

Локальное размещение пористой вставки непосредственно вблизи зазора между стопором и стаканом наиболее эффективно уменьшило отложение глинозема.

Механическая прочность пористой вставки и стойкость к эрозии оказались достаточными и не вызывали проблем при разливке.

Для уменьшения шероховатости поверхности головки стопора опробовали горячее напыление диоксида циркония. При этом отложение глинозема уменьшилось примерно на 30 %.

При непрерывной разливке зарастание погружного стакана на участке вблизи выходного отверстия не только препятствует повышению коэффициента серийности разливки, но приводит к смещению потока стали и поэтому служит причиной аномалий качества слитка. Известны разные меры предотвращения зарастания, в том числе изготовление стакана из материала, препятствующего отложению глинозема, и применение стакана с каналом ступенчатого профиля. Между тем на том же заводе в Фукуяме сумели ограничить зарастание стакана путем изменения формы выходного отверстия, что позволило повысить показатель серийности разливки.

6.3. Новые приемы использования погружных стаканов для повышения эффективности разливки

В последние годы для решения разных задач по повышению надежности разливочного оборудования на ряде фирм предложены и опробованы (на моделях и в промышленных условиях) разные способы создания вихревых потоков в погружном стакане.

Один из таких проектов реализуют фирма «British Steel», национальный бельгийский Центр металлургических исследований, фирмы «Hoogovens», «Mefos» и Союз немецких специалистов по черной металлургии. По этому проекту предусмотрено использовать обычный промежуточный ковш и спроектировать погружной стакан нового типа, при использовании которого образуется более плавный поток жидкой стали в кристаллизатор, этот стакан меньше забивается. Так, например, разрабатывается специальный стакан, который обеспечивает закрученный поток металла в погружном стакане (рис. 6.2).

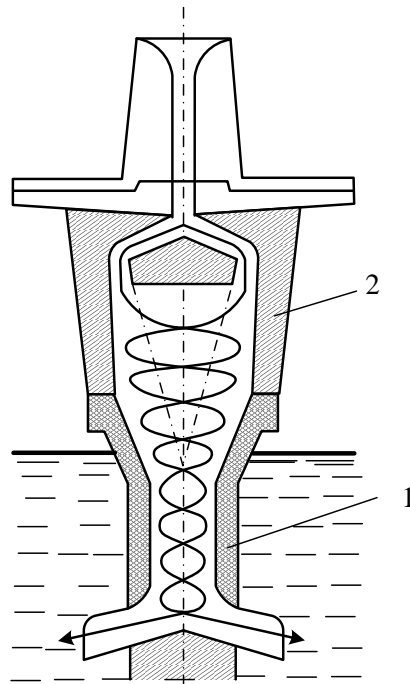


Рис. 6.2. Схема погружного стакана (1) с дополнительной секцией (2) для создания завихрений в потоке металла

По сравнению с обычным стаканом этот стакан нового типа имеет несколько преимуществ: создается избыточное давление внутри стакана, что позволяет предотвратить подсос воздуха и слипание включений благодаря эффекту возникновения центробежных сил в закрученном потоке, более равномерное распределение скоростей в поперечных сечениях выходных отверстий, приводящее к меньшим максимальным скоростям.

Несколько иную, более сложную систему для создания завихрения струи металла в погружном стакане при одновременном точном регулировании истечения металла из промежуточного ковша в кристаллизатор разработали и применяют на фирме «Voest Alpine Stahl» (Австрия).

Система в известной мере напоминает обычную стопорную систему, но вместо стопора используют поворотный стержень, на конце которого имеется «пiston» с тангенциальным отверстием. Этот piston плотно вставляется внутрь погружного стакана. Металл, входящий в тангенциальное отверстие, закручивается внутри пистона с большой скоростью, его количество регулируется глубиной опускания пистона в стакан и, следовательно, величиной входного отверстия (рис. 6.3).

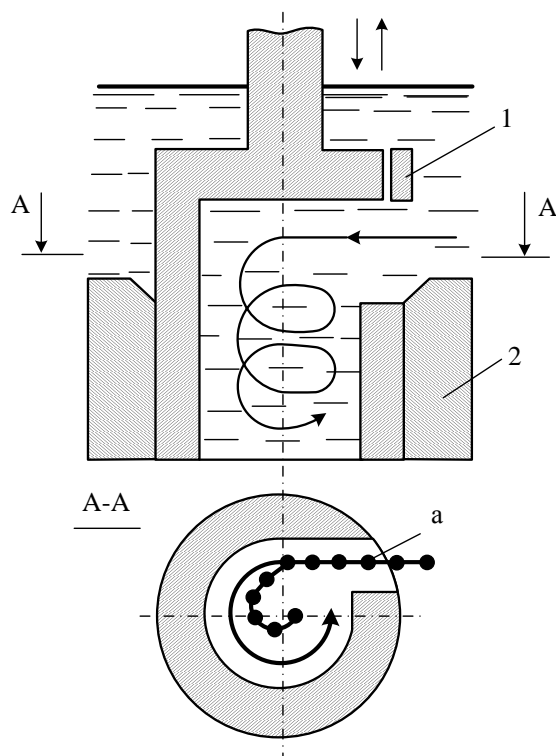


Рис. 6.3. Схематическое изображение генерации вихревого движения металла в пистоне (1) и погружном стакане (2)

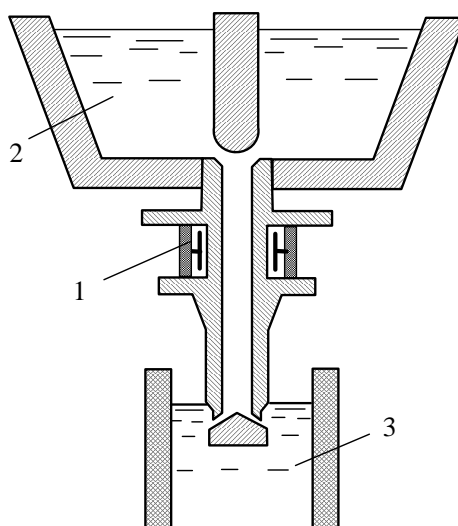
Как и в предыдущем случае, неметаллические включения концентрируются в центре струи (см. рис. 6.3) и не отлагаются на стенках стакана, у стенок создается положительное давление, препятствующее проникновению воздуха. Результатом этого явилось повышение качества блюмов сечением 270×360 мм, в частности снижение в среднем примерно на 20 % загрязненности макровключениями.

Таким образом, закручивание струи металла в погружном стакане имеет достаточно преимуществ. Однако при этом усложняются конструкция стакана и его обслуживание, т.е. требуются дополнительные затраты для непрерывной разливки с использованием этого приема. Кроме того, накоплено еще слишком мало данных и перспективы применения определяются суммарной экономической эффективностью (положительной или отрицательной).

При слишком низком перегреве стали в промежуточном ковше возникает риск формирования настлы и забивания погружного стакана, а также ухудшаются условия для всплывания включений. Более интересным техническим решением являются поддержание надлежащего перегрева стали в промежуточном ковше и отвод тепла от жидкой стали на участке между промежуточным ковшом и кристаллизатором.

Концепция непрерывной разливки стали с низким перегревом бы-

ла разработана фирмой «British Steel» и национальным бельгийским Центром металлургических исследований. Процесс основан на использовании стакана с огнеупорной вставкой с водоохлаждаемой медной трубкой, играющей роль теплообменника (рис. 6.4). Использование такого стакана обеспечивает саморегулируемый отвод тепла, т.е. чем больше перегрев стали, тем больше отвод тепла. В настоящее время проводят испытания опытного оборудования на промышленной МНЛЗ фирмы «British Steel», чтобы можно было показать осуществимость этой концепции в промышленном масштабе. Результаты, полученные при серийной разливке пяти ковшей высокоуглеродистой стали, показали, что ее перегрев уменьшается на 40 – 60 %. Как и ожидали, повышается качество продукции, при низком перегреве стали в структуре производимых заготовок наблюдается более мелкое зерно и уменьшается ликвация. Изучают вопрос о возможности более быстрой разливки при использовании этого метода. Подобные эксперименты были проведены фирмой CRM.



*Рис. 6.4. Схема расположения теплообменника в погружном стакане:
1 – теплообменник; 2 – промежуточный ковш; 3 – кристаллизатор*

Еще одним способом уменьшения перегрева стали является введение в нее порошка или проволоки. Идея способа не нова. Еще в 40- и 50-х годах XX века при отливке слитков проводились его исследования, в том числе и в России, но устойчивых положительных результатов получено не было. В последнее время было вновь рассмотрено введение охладителей в промежуточном ковше, через стопорное устройство, в открытую струю, в кристаллизатор. Однако при вводе охладителей в

промежуточный ковш ухудшается чистота стали и забивается стакан, а в других случаях происходит повторное окисление и сталь плохо перемешивается. В связи с этим проводятся исследования по разработке более эффективного способа введения охлаждающего агента. В методе, предложенном Центром металлургических исследований, предусмотрено вводить в струю стали мелкий стальной порошок (рис. 6.5). Чтобы обеспечить разливку стали с низким перегревом, можно сочетать использование теплообменника с использованием устройства для ввода порошка через огнеупорную вставку.

При непрерывной подаче аргона в стакане создается инертная среда, предотвращается подсос воздуха.

При использовании этого метода можно ввести до 2 % стального порошка. В случае ввода 1 % стального порошка получают литые заготовки с полностью равноосной структурой, когда начальный перегрев стали в промежуточном ковше равен 30 °С (рис. 6.6). Центр металлургических исследований Бельгии, Металлургический научно-исследовательский центр Италии, Французский научно-исследовательский институт и Союз немецких специалистов по черной металлургии начали эксперименты по вводу алюминия, ниобия, титана и бора, получая при этом хорошие результаты.

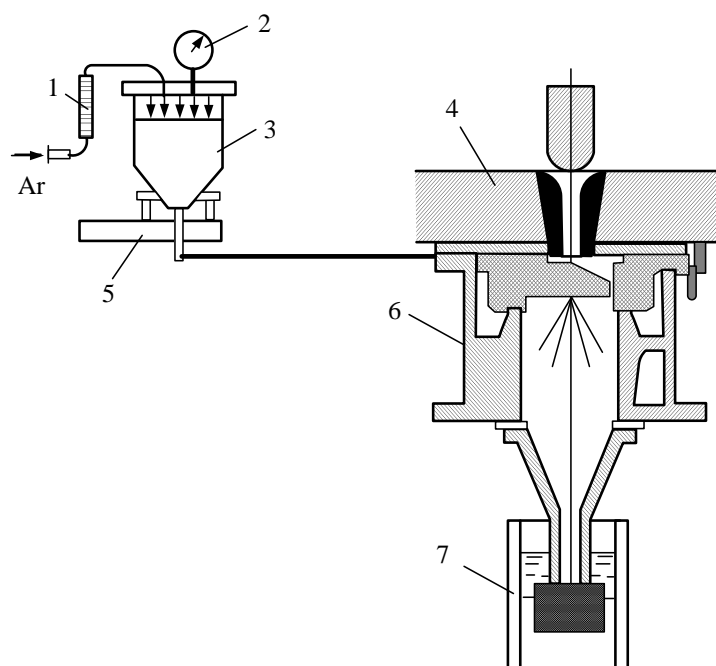


Рис. 6.5. Схема устройства для введения металлического порошка в струю металла при непрерывной разливке: 1 – измеритель скорости подачи аргона; 2 – манометр; 3 – контейнер с порошком; 4 – промежуточный ковш; 5 – месдоза; 6 – погружной стакан специальной конструкции; 7 – кристаллизатор

Из изложенного следует, что в совершенствовании конструкции погружных стаканов скрыты большие возможности в части стабилизации процесса непрерывной разливки и повышения качества литых заготовок.

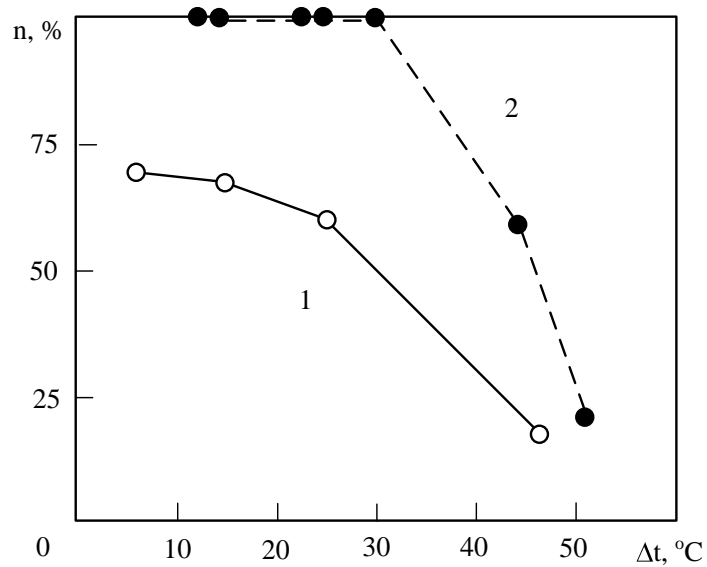


Рис. 6.5. Влияние перегрева стали на входе в стакан (Δt) на количество равноосных зерен в структуре слитка (n) при разливке без ввода порошка в струю (1) и с введением порошка (2)

Глава 7. Кристаллизаторы, их конструкция и механизмы качания

Кристаллизатор является одним из важнейших узлов МНЛЗ, который в значительной степени определяет их производительность и качество получаемой продукции, так как в кристаллизаторе формируется слиток. Кристаллизатор должен обеспечивать интенсивный отвод тепла от кристаллизующейся стали и образование по периметру корочки, которая на выходе должна выдерживать ферростатическое давление жидкой фазы. Конструкция кристаллизатора должна обеспечивать: высокое качество заготовок из стали любых марок; стабильность процесса разлива; необходимую скорость вытягивания слитка, определяющую, в конечном итоге, производительность МНЛЗ; высокую стойкость медных стенок, обеспечивающую рентабельную работу установки; безопасность работы. Поскольку в кристаллизаторе формируется оболочка слитка необходимой толщины и прочности, такие дефекты заготовок как наружные поперечные и продольные трещины, искажение профиля, поверхностные складки и ужимы находятся в прямой зависимости от конструктивных и теплофизических характеристик кристаллизатора, способа подачи металла в кристаллизатор и защиты от вторичного окисления. По конструкции кристаллизаторы современных МНЛЗ можно разделить на три основных типа: гильзовые, блочные и сборные.

Гильзовые кристаллизаторы применяют в основном для отливки сортовых заготовок размерами до 0,20 – 0,25 м. Гильзовый кристаллизатор состоит из стального корпуса и тонкостенной медной гильзы, внутренний размер которой соответствует сечению заготовки. Гильза толщиной 0,006 – 0,013 м, в зависимости от размеров рабочей полости, крепится в корпусе при помощи фланцев и центрируется при помощи ребер. Нижний конец гильзы, как правило, свободен и снабжен резиновым уплотнением. Охлаждающая вода циркулирует в зазоре между корпусом кристаллизатора и гильзой. Основными достоинствами кристаллизаторов этого типа являются: отсутствие стыков в стенке, которые часто являются причиной зависания корочки слитка; высокая интенсивность теплоотвода, что позволяет разливать стали с более высокими скоростями; а также простота конструкции; низкая стоимость; малый удельный расход меди; легкая смена изношенных гильз.

Блочные кристаллизаторы применяют для отливки многогранных, круглых и крупных блюмовых заготовок. Такие кристаллизаторы изготавливают из медных поковок или отливок с рабочей полостью в середине. В стенках толщиной 0,05 – 0,10 м сверлят каналы для воды. Блок

после его изготовления крепят в стальном корпусе. Основным преимуществом является отсутствие стыков в стенках, но вместе с тем имеются весьма существенные недостатки: высокая трудоемкость изготовления, большой расход меди, увеличение сечения при ремонтах и др. Из-за перечисленных недостатков блочные кристаллизаторы имеют ограниченное применение. Разновидностью блочных кристаллизаторов можно считать сварные кристаллизаторы. Их изготавливают при помощи лучевой сварки из плит хромомедного сплава таким образом, что в результате получается как бы блок, который затем подвергается механической обработке. Плиты, из которых сваривается такой кристаллизатор, имеют сравнительно малую толщину и во избежание короблений стягиваются большим числом шпилек со стальными стенками подобно сборным кристаллизаторам.

Наибольшее распространение получили сборные кристаллизаторы из четырех отдельных стенок. Вода для охлаждения кристаллизатора подается в пазы, выполненные в стальной опорной плите, или в сверленные каналы, выполненные непосредственно в медной стенке. Стойкость сборных кристаллизаторов (150 – 200 плавок) в два-три раза выше, чем у тонкостенных: они ремонтоспособны и допускают две-три перестройки при ремонтах.

Конструкция кристаллизатора в значительной мере определяется принятой системой охлаждения – петлевой или прямоточной. При петлевой системе движения воды вертикальные каналы по периметру стенок кристаллизатора объединяют в три секции. Крайние секции включают в себя каналы в узких стенках кристаллизатора и по краям широких стенок; в среднюю секцию входят каналы центральных частей широких стенок. Вода подается вначале сверху вниз через крайние секции, а затем проходит среднюю секцию вверх и идет на слив. При прямоточной системе охлаждения каждая из четырех стенок выполнена с независимым подводом и отводом воды. Прямоточная система обеспечивает лучшее охлаждение стенок кристаллизатора и более низкую температуру воды на выходе, чем петлевая. Последний фактор оказывает большое влияние на работоспособность кристаллизатора, так как увеличение температуры охлаждающей воды более 313 К резко увеличивает выделение осадков на стенках каналов. Кроме того, большая интенсивность охлаждения кристаллизаторов с прямоточным охлаждением способствует увеличению скорости разливки. По этим причинам кристаллизаторы с прямоточной системой охлаждения предпочтительнее кристаллизаторов петлевого охлаждения.

7.1. Конструктивные особенности кристаллизаторов для отливки слябов

Широкое применение нашли сборные толстостенные кристаллизаторы. Кристаллизатор такой конструкции состоит из стального корпуса, к стенкам которого крепят шпильками медные плиты. Между широкими стенками вставлены подвижные узкие стенки, что позволяет изменять ширину рабочей плоскости кристаллизатора. Медные плиты имеют каналы диаметром 0,02 м для охлаждающей воды. Рабочую поверхность широких стенок, обращенную к жидкому металлу, выполняют гладкой или волнистой. Толщина медных стенок составляет 0,065 – 0,08 м. Общепринятым материалом рабочих стенок кристаллизаторов является чистая медь марок М1, М2, М3. Механические свойства меди и особенно ее низкая твердость и малое сопротивление износу ограничивают стойкость кристаллизаторов, а высокий коэффициент линейного расширения обуславливает деформацию рабочих стенок, что также снижает стойкость кристаллизаторов. Для нормальной работы кристаллизаторов необходимо, чтобы материал, из которого изготовлены рабочие стенки, обладал, помимо высокой теплопроводности, твердостью при повышенных температурах и пределом текучести, который в условиях эксплуатации кристаллизатора был бы выше возможных термических напряжений. Температура разупрочнения (рекристаллизации) материала должна быть выше максимальной температуры стенок кристаллизатора в условиях эксплуатации.

Температуру разупрочнения материала можно повысить, легируя медь другими элементами (Sn, Cr, Si, Mg, Ni). Однако введение в медь большинства этих элементов значительно снижает ее теплопроводность. Широкое применение в промышленности нашли узкие рабочие стенки кристаллизаторов из сплава меди с небольшим количеством серебра (примерно 0,1 %) или хрома. Основным преимуществом таких сплавов является повышение температуры рекристаллизации, что снижает либо деформацию рабочих стенок. Медносеребряные сплавы обладают хорошей теплопроводностью (примерно $15,8 \cdot 10^2$ Вт/м К), высоким пределом текучести (примерно 240 МПа), повышенной температурой рекристаллизации (примерно 523 К). Удовлетворительные результаты получены при использовании узких стенок кристаллизатора из меднохромовых сплавов, обладающих теплопроводностью примерно $15,0 \cdot 10^2$ Вт/м·К, пределом текучести примерно 290 МПа и температурой рекристаллизации примерно 713 К, применение бескислородной меди для рабочих стенок кристаллизаторов приводит к образованию на поверхности заготовок паукообразных трещин за счет проникновения меди в заготовку, что приводит к снижению выхода годного. Для того чтобы ис-

ключить проникновение меди в сляб, рабочую поверхность стенок кристаллизаторов покрывают хромом, никелем и т.д. Полный износ никелевого покрытия толщиной $3 \cdot 10^{-3}$ м происходит после разливки 500 – 600 плавов, хромистого – 300 – 400 плавов. За счет никелевого покрытия повышается температура рабочей стенки до 563 К. Наибольшему износу подвержены узкие стенки кристаллизаторов в нижней части за счет абразивного действия оболочки сляба. При образовании впадин на узкой стенке более $1,5 \cdot 10^{-3}$ м кристаллизатор выводят из эксплуатации, а узкие стенки заменяют.

На отечественных МНЛЗ применяют кристаллизаторы длиной 1,2 м. На зарубежных машинах даже в случае отливки слябов большого сечения со сравнительно высокими скоростями, используют более короткие кристаллизаторы (0,70 м).

Для заданного сечения сляба и скорости разливки существует определенная длина кристаллизатора, при которой обеспечивается оптимальный режим охлаждения поверхности сляба. Это создает условия для снижения напряжений в оболочке слитка при повышении скорости разливки и улучшения качества сляба. В связи с тем, что теплоотвод в нижней части кристаллизатора меньше, чем в зоне вторичного охлаждения, увеличение длины кристаллизатора более 0,70 м не приводит к увеличению теплоотвода от сляба. Длина кристаллизатора 0,50 м может быть рекомендована в качестве оптимальной по интенсивности теплопередачи. Однако необходимо учитывать, что в длинном кристаллизаторе обеспечивается более эффективное поддерживание оболочки сляба; длина кристаллизатора определяется также силами трения сляба в процессе его перемещения вдоль рабочих стенок и выпучиванием граней слитка под действием ферростатического давления в зоне поддерживающих элементов вторичного охлаждения, расположенных под кристаллизатором. Применение кристаллизаторов длиной менее 0,70 м затрудняется тем, что требует очень малого расстояния между роликами в верхней части зоны вторичного охлаждения, т.е. уменьшения их диаметра и жесткости. При этом также уменьшается объем кристаллизатора после введения в него затравки. При отливке слябов минимальное время наполнения кристаллизатора металлом до начала разливки, при котором обеспечивается надежное сцепление слитка с головкой затравки, равно 60 с.

Температура поверхности слитка на выходе из длинного кристаллизатора составляет 1073 – 1173 К (в зависимости от скорости разливки и температуры жидкой стали), поэтому холодные участки на поверхности сляба могут разогреваться, в результате чего возникают внутренние трещины и увеличивается опасность прорыва металла. Горячие участки

подвергаются ускоренному охлаждению, что связано с образованием поверхностных трещин. Обычно под кристаллизатором сляб подвергается интенсивному охлаждению для исключения прорыва металла. В этом случае увеличивается вероятность образования поверхностных трещин на горячих участках сляба, поэтому теплоотвод от сляба под кристаллизатором должен регулироваться таким образом, чтобы он не намного превышал отвод тепла в нижней части кристаллизатора.

Использование укороченного кристаллизатора способствует получению более равномерной температуры поверхности по периферии сляба, что позволяет осуществить ниже кристаллизатора режим охлаждения, обеспечивающий отсутствие прорывов металла и поверхностных трещин.

На большинстве МНЛЗ необходимо отливать слябы разных размеров. Изменять ширину сляба можно путем замены кристаллизаторов, однако это связано с длительными простоями машины и необходимостью иметь большой парк кристаллизаторов различного сечения. Изменение ширины слитка производят путем перемещения узких стенок кристаллизаторов, эта операция не требует замены кристаллизатора и осуществляется в течение 15 – 20 мин (смена кристаллизаторов на двухручьеваой МНЛЗ производится за 2,5 – 3,0 ч).

Типичная конструкция слябового составного кристаллизатора приведена на рис. 7.1. Каждая стенка представляет собой медную обработанную плиту с каналами для воды, закрепленную на стальной плите сварной конструкции, которая одновременно является подводным и отводящим коллектором для воды. Все четыре стенки устанавливаются на общей сварной раме, причем базовая стенка закреплена неподвижно, а остальные могут перемещаться посредством встроенных в раму червячно-винтовых механизмов. Эти механизмы позволяют перестраивать кристаллизатор по ширине непосредственно в машине.

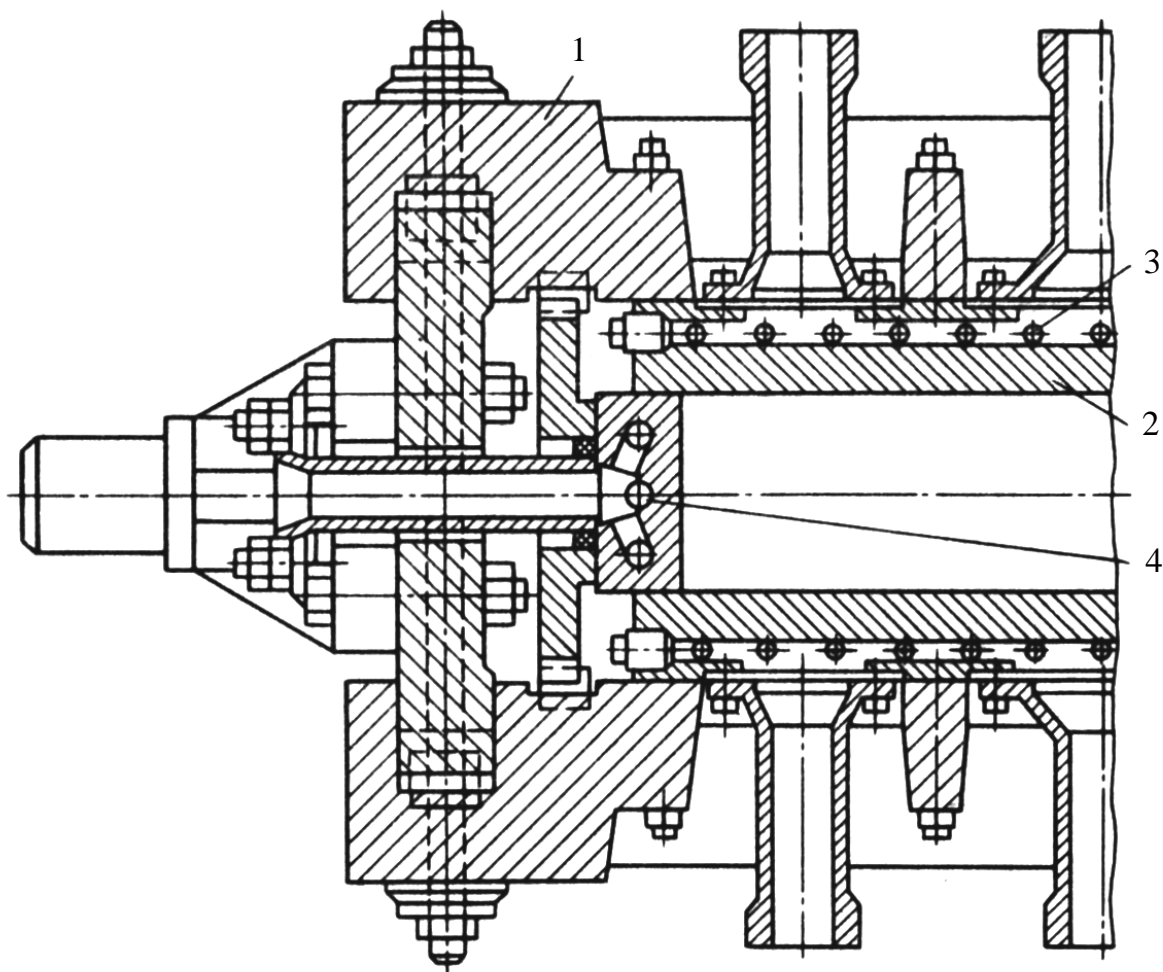


Рис. 7.1. Сборный кристаллизатор для отливки слябов: 1 – стальные стенки; 2 – медные плиты; 3 – каналы для охлаждающей воды; 4 – узкие медные стенки

Между нажимными винтами и подвижной широкой стенкой установлены пакеты пружин, которые уменьшают возможность деформации медных плит на стыке узких и широких стенок при их тепловом расширении. Подвод воды к кристаллизатору выполнен в виде быстроразъемных соединений, независимый для каждой стенки.

В нижней части кристаллизатора установлен ряд роликов по всем четырем граням сляба, которые обеспечивают центровку слитка относительно медных стенок, что создает условия для более равномерного теплоотвода по сторонам слитка.

Разработанные конструкции кристаллизаторов позволяют производить изменение ширины отливаемой заготовки, не прерывая процесса разливки. Это кристаллизаторы с диапазоном регулирования ширины 0,95 – 2,10 м при толщине сляба 0,25 м. Максимальный интервал разо-

вого изменения ширины 0,20 м. Длина кристаллизатора 0,70 м. Узкие стенки таких кристаллизаторов состоят из верхних и нижних плит, причем стык между ними пригнан очень плотно, во избежание затекания в него жидкого металла. Верхние и нижние части узких стенок можно попарно перемещать независимо друг от друга для увеличения или уменьшения ширины заготовки. В процессе изменения ширины кристаллизатора между широкими и узкими стенками образуется зазор до $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, необходимый для перемещения узких стенок. При разливке не наблюдается затекания стали в этот зазор. Скорость перемещения узких стенок составляет примерно $2,5 \cdot 10^{-4}$ м/с.

В последнее время находит применение разливка металла на МНЛЗ в сдвоенные кристаллизаторы (рис. 7.2). Разработка сдвоенных кристаллизаторов обусловлена тем, что в сортаменте МНЛЗ, кроме широких, имеются и узкие слябы, что требует значительного увеличения продолжительности их разливки. Сдвоенный кристаллизатор образуется при помощи водоохлаждаемой разделительной стенки, которая размещается посередине широких граней стандартного кристаллизатора. Разделительная стенка состоит из стальных и медных плит и позволяет изменять конусность в каждой из двух рабочих полостей кристаллизатора. Медные плиты взаимозаменяемы с торцовыми стенками широкого кристаллизатора. Сдвоенный кристаллизатор позволяет одновременно отливать два сляба сечением 0,205-0,250×0,600-0,900 м.

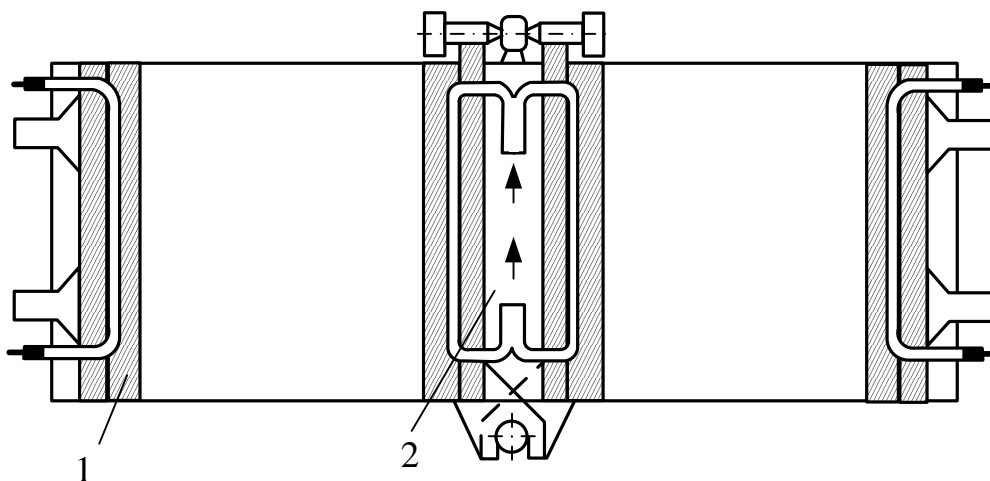


Рис. 7.2. Сдвоенный кристаллизатор: 1 – узкая стенка кристаллизатора; 2 – разделительная стенка

7.2. Совершенствование конструкций кристаллизаторов и систем их качания

Основным узлом любой МНЛЗ является кристаллизатор. Его функция заключается в том, чтобы отвести тепло от расплавленного металла к охладителю и сформировать на поверхности образующейся заготовки надежную корку, выдерживающую ферростатическое давление металла после выхода заготовки из кристаллизатора. Технологичность процесса непрерывной разливки в значительной степени зависит от работоспособности кристаллизатора, определяемой его конструкцией и используемым материалом для изготовления.

Независимо от конструкции кристаллизаторы работают в экстремальных условиях воздействия высоких температур металлического расплава. Кроме того, в процессе эксплуатации кристаллизаторы подвергаются длительному термоциклированию. В результате в стенках кристаллизатора возникают напряжения, которые постепенно накапливаются, превышают пределы упругости и даже текучести и материал кристаллизатора начинает работать в условиях длительной ползучести. В конечном итоге обычно появляется остаточная деформация в стенках, которые прогибаются внутрь. При этом нарушается геометрия каналов для циркуляции охладителя и возникают условия для механического износа стенок выходящей заготовки. Любое изменение толщины стенки кристаллизатора негативно влияет на качество заготовки и может привести к разрыву корки. В этом случае на поверхности заготовки появляются продольные и поперечные трещины.

7.3. Новые материалы для изготовления кристаллизаторов, совершенствование их конструкций

Материал кристаллизаторов непрерывной разливки должен быть достаточно теплопроводным и жаропрочным, химически неактивным по отношению к расплаву, достаточно твердым и износостойким, выдерживать длительные термосмены в диапазоне рабочих температур разливки, обладать стабильностью свойств.

Традиционным материалом для кристаллизатора является высоко-теплопроводная ($\lambda = 400$ Вт/м·К) медь. Но она в какой-то мере взаимодействует с расплавом, имеет довольно низкую твердость (НВ 0,800 – 1,0 ГПа), а также довольно существенно разупрочняется в интервале рабочих температур (250 – 300 °С) вследствие собирательной рекристаллизации.

Легирование меди любыми элементами приводит, с одной стороны, к повышению температуры ее разупрочнения, а с другой – к сниже-

нию теплопроводности. Например, медь, легированная долями процента серебра, олова или циркония, имеет $\lambda = 370 - 380$ Вт/м·К), а из-за уменьшения теплопроводности по сравнению с чистой медью примерно на 50 °С возрастает температура стенок кристаллизатора, достигая 265 °С.

Теплопроводность хромовой или хромоциркониевой бронзы еще ниже: 320 Вт/м·К, температура стенок растет при этом по прямолинейному закону и достигает 280 °С.

Долгое время у нас в стране и за рубежом применяли сплав меди с серебром. Однако из-за его дороговизны применение этого сплава сократилось, но и в настоящее время он применяется на МНЛЗ ОАО «Северсталь». Используют сплавы Cu-Cr, Cu-Zr, Cu-Cr-Zr. За рубежом широкое распространение получили дисперсно-твердеющие бронзы, такие как хромистая, бериллиевая, кобальтобериллиевая, хромоциркониевая.

Дисперсно-твердеющие бронзы отличает сложность как литья, так и последующей термообработки. Это приводит к удорожанию кристаллизаторов при снижении теплопроводности на 60 – 80 % по сравнению с медными, при этом срок эксплуатации возрастает незначительно.

Поэтому в мировой практике для повышения технологических характеристик материала кристаллизаторов в последнее время нашли распространение процессы поверхностного упрочнения, т.е. нанесение защитных покрытий.

Гальванические, в основном хромоникелевые, покрытия увеличивают стойкость на 25 – 43 % за счет предотвращения химического взаимодействия расплава с материалом кристаллизатора, а также увеличения твердости. Однако эти покрытия склонны к отслаиванию в процессе эксплуатации.

Газоплазменное напыление позволяет расширить спектр применяемых материалов. Однако для увеличения адгезии покрытия к основе требуется последующая термообработка, что удорожает и усложняет процесс. Кроме того, покрытие имеет значительную шероховатость, удаляемую только механической обработкой.

Наиболее прост метод термомодификации, позволяющий увеличить твердость поверхности, получить упрочненный слой глубиной до 2,0 мм, достичь минимального снижения теплопроводности материала и благодаря образованию переходного слоя на границе покрытие–основа обеспечить высокую прочность сцепления.

Имеются сведения, что стойкость такого кристаллизатора в четыре-шесть раз выше, чем с другими покрытиями.

Украинским ГНИИ металлов (в Харькове) применен способ термомодификационного нанесения в промышленных условиях защитных по-

крытий на базе алюминия на рабочую поверхность гильз кристаллизаторов, позволяющий повысить их эксплуатационную стойкость.

Алитирование увеличивает микротвердость поверхности до $H_{\mu} \approx 300 - 400$ при H_{μ} основы $90 - 100$. Глубину слоя следует четко регламентировать, так как при значительных слоях (более 0,8 мм) возникают структурные напряжения, которые могут привести к образованию трещин на поверхности.

Создана промышленная технология нанесения покрытий, предполагающая: установку компенсаторов напряжения в цилиндрическом кристаллизаторе на период ведения процесса, снижение длительного отжига с 18 до 7 ч, температуры с 950 до 750 °С при загрузке изделий в печь, нагретую до 350 – 400 °С. Это позволило устранить деформацию кристаллизаторов в период нанесения покрытия. Плитовые кристаллизаторы обрабатываются на специальной «постели».

Защитные покрытия на базе алюминия наносились на партию серийных промышленных кристаллизаторов диаметром 175, 200, 250, 350 и 400 мм. Установлено, что их стойкость повысилась с 165 до 261 – 256 т, т.е. примерно в 1,55 раза.

Испытания показали, что параметры литья заготовок различного размерного и марочного сортамента соответствовали действующей на предприятии технологической инструкции. Дефекты на поверхности литых заготовок отсутствовали, структура была однородной по длине.

В конструкции кристаллизаторов и систем их качания за последнее время произошли весьма существенные изменения.

Фирма «Voest-Alpine Industrieanlagenbau» в настоящее время является лидером в области поставки МНЛЗ, обеспечивает непрерывное совершенствование оборудования, разработав за последние годы ряд новых его видов. Для слабовых установок непрерывной разливки были созданы кристаллизаторы кассетного типа с оптимизированными массой и потребностью в техническом обслуживании. Эти кристаллизаторы отличаются:

- самое короткое время их замены благодаря использованию автоматического устройства для подсоединения системы водяного охлаждения;

- применение автоматической системы для изменения ширины кристаллизатора с четырьмя приводами на один ручей, причем эту систему не надо заменять при замене кристаллизатора;

- применение быстро заменяемой кассеты, состоящей из тонких медных плит, закрепленных стальными сварными болтами на опорной плите, позволяющей уменьшить общее время производственного цикла и число запасных частей; кроме того, весь узел можно легко заменить и

повторно обработать;

– применение на медных плитах пазов оптимальной формы.

Одной из основных проблем при создании системы скоростной разливки была разработка фирмой кристаллизатора, который обеспечил бы оптимальную и равномерную передачу тепла от корки стали к медным пластинам, абсолютно необходимую для формирования однородной стальной корки по всему периметру кристаллизатора. Передача тепла от корки слитка к стенкам кристаллизатора сильно уменьшается при потере контакта между слитком и кристаллизатором, при этом изменяется характер усадки слитка, что может привести к возникновению дефектов в корке слитка.

В верхней части кристаллизатора наблюдается большая степень усадки, чем в его нижней части. По этой причине фирма рекомендует обеспечивать параболическую конусность, чтобы можно было улучшить характер контакта по всей длине кристаллизатора. Однако излишняя конусность приводит к возникновению пиков давления на участке кромки, особенно в нижней части кристаллизатора, возникают недопустимо большие силы трения при вытягивании слитка. Кроме того, к конусности в средней части и в углу кристаллизатора предъявляются разные требования, что связано со следующими обстоятельствами:

– большая конусность в средней части обеспечивает однородный рост корки;

– уменьшенная конусность в углу нижней части кристаллизатора обеспечивает ограничение сил трения.

Чтобы выполнить эти требования, поступают следующим образом: обеспечивают сильную конусность на всей средней части и в углу верхней части кристаллизатора; не создают конусность в углах нижней части кристаллизатора. Около углов нет необходимости в прямом контакте между кромкой заготовки и кристаллизатором. На этом участке получается двухмерная теплопередача, поэтому всегда происходит достаточный рост корки. Обеспечивается плавный радиус перехода от кромки к конусному участку. При такой форме кристаллизатора обеспечивается однородный рост корки не только на средних участках, но и на участках, близких к углам, а также предотвращение возникновения излишних сил трения, особенно в нижней части кристаллизатора.

Таким образом, можно отметить три основных требования, выполнение которых позволяет увеличить скорость разливки:

1) необходимо увеличить длину гильзы кристаллизатора приблизительно до 900 – 1000 мм, чтобы можно было увеличить время пребывания слитка в кристаллизаторе;

2) необходимо обеспечить параболическую конусность кристал-

лизатора по его длине, причем более высокую, чем в обычном кристаллизаторе, чтобы получился однородный рост корки;

3) в нижней части кристаллизатора (на участке кромки) не должно быть конусности.

С учетом этих требований фирмой создан оптимальный кристаллизатор «Diamond» (похожий на алмаз, если на него посмотреть сверху).

Опыт, накопленный при эксплуатации нескольких установок непрерывной разливки (со скоростью 5,2 м/мин) стали на квадратные заготовки во всем мире, показал, что форма заготовки, качество литой заготовки и срок службы кристаллизатора такие же, как и в случае обычного кристаллизатора, или даже лучшие при значительно более высоких (на 22 – 56 %) скоростях разливки. Надежность кристаллизатора «Diamond» была проверена при разливке открытой струей, а также с использованием погружного разливочного стакана сталей разных марок в заготовки квадратного сечения.

Фирма «Voest-Alpine Industrieanlagenbau» (VAI) разработала новую верхнюю часть для блюмовых установок непрерывной разливки с большими преимуществами по сравнению с обычными системами.

Новый кристаллизатор с высокими служебными свойствами характеризуется наличием одинарных плоских медных плит с минимальной толщиной стенки и резьбовых сварных шпилек для присоединения к опорным плитам. В конструкции предусмотрено наличие охлаждающих канавок в опорных плитах и использование трубок с противотоком. Преимущества такой конструкции можно связать с:

- меньшими капитальными расходами на медные плиты (экономия обеспечивается при первой установке и еще большая – при использовании рабочих сменных деталей),
- повышенной теплопередачей,
- меньшими потерями на вихревые токи при электромагнитном перемешивании (что объясняется меньшей толщиной плит),
- использованием внешнего устройства электромагнитного перемешивания даже в случае заготовок большого сечения.

Такая оптимизированная верхняя часть установлена на блюмовой МНЛЗ на заводе фирмы «Voest-Alpine Stahl» (Австрия) в 1996 г. Кроме того, ее уже внедрили на восьми заводах. В результате значительно повышаются качество продукции, производительность МНЛЗ, особенно при разливке стали критических марок.

В частности, кристаллизаторы VAI внедрены при реконструкции двух МНЛЗ для отливки заготовок сечением 260×260 мм завода «Ньюкасл» (Южная Африка) одновременно с установкой под кристаллизатором системы для электромагнитного перемешивания.

Применение больших скоростей на установках литья сортовых заготовок, блюмов дает возможность увеличить производительность МНЛЗ более чем вдвое – в зависимости от размеров непрерывно-литого слитка и химического состава стали. По состоянию на декабрь 2000 г. в VAI получены заказы от 15 производителей стали на высокоскоростную технологию литья сортовых заготовок.

Кристаллизатор с параболическим профилем стенок был испытан на шестиручьевой МНЛЗ завода «Нова Хута» в Остраве (Чехия) при отливке заготовок 130×130 мм (на одном ручье) со скоростью разливки до 5,2 м/мин, при отливке заготовок в обычном кристаллизаторе со скоростью 2,6 м/мин.

Сопоставление протравленных темплетов слитков обычного непрерывного и отлитого через экспериментальный кристаллизатор показало, что в подповерхностной зоне этих темплетов наблюдается равноосная структура затвердевания. Так называемый быстро охлажденный слой в образце, отлитом через экспериментальный кристаллизатор, получается гораздо более толстым (около 10 мм), чем в образце, отлитом обычным способом. Доля равноосного затвердевания в центральной зоне опытного непрерывного слитка тоже больше.

Кристаллизаторы VAI различного типа, в том числе «Diamond», были использованы при сооружении многоцелевой МНЛЗ (для отливки 800 тыс. т в год сортовых, балочных заготовок и блюмов из сталей широкого сортамента) в 1998 г. на заводе фирмы «Birmingham Southeast LLC» в Картерсвилле (США).

При анализе качества готовой продукции такие поверхностные дефекты, как трещины, углубления и включения, не обнаружены. Следы качания были однородными и не оказывали решающего влияния на качество продукции. Качество внутренних участков заготовок было также удовлетворительным.

Новая многоцелевая МНЛЗ дает возможность разливать заготовки разных сечений, предназначенные для прокатки строительных профилей.

На Молдавском металлургическом заводе одноконусные гильзы с конусностью 0,8 % на 1 м длины, используемые для разливки заготовок сечением 125×125 мм со скоростью 2,0 – 2,5 м/мин, сначала заменили на двух-, а затем на трехконусные гильзы с конусностью 0,8 % вверху, 0,5 % в середине и 0,2 % внизу. Эти гильзы обеспечивали скорость разливки 2,5 – 3,0 м/мин. Одновременно радиус углов внутренней полости уменьшили с 6 до 4 мм. Повышение жесткости углов позволило снизить количество угловых трещин в заготовках трещиночувствительных сталей в три-четыре раза.

Для разливки сортовых заготовок со скоростью более 3,5 м/мин во ВНИИМЕТМАШ разработана конструкция гильзы VMS (VM-sin), в которой используется применяемый при высокоскоростной разливке тонких слябов принцип компенсации усадки выпуклой синусоидальной затвердевающей корочки ее постепенным выпрямлением. Амплитуды синусоид монотонно убывают от максимума на верхнем торце гильзы до нуля на границе выпуклой и плоской частей гильзы (рис. 7.3).

Выпрямление выпуклых синусоидальных участков соответствует параболической зависимости, которой описывается также процесс усадки корочки слитка. При подборе амплитуды выпуклых участков и конусности плоских боковых участков гильзы можно получить зависимость, соответствующую параболической форме усадки корочки для разных скоростей разливки и марок стали.

Выпуклая в средней части поперечного сечения по сторонам форма затвердевающей корочки обеспечивает центрирование слитка в кристаллизаторе, а ее постепенное выпрямление создает условия интенсивного равномерного теплоотвода в верхней части кристаллизатора и образования жесткой равномерной корочки. Центрирование слитка в верхней половине гильзы кристаллизатора и увеличение теплоотвода в средней части стенки гильзы приводят к снижению термических напряжений в углах затвердевающей в кристаллизаторе корочки. В результате существенно снизилось количество мелких угловых трещин на заготовках трещиночувствительных сталей. Ромбичность заготовок уменьшилась с 4 – 8 до 2 – 6 мм. Количество прорывов по трещине уменьшилось до 0,2 % от числа подготовленных ручьев. Скорость разливки заготовок сечением 15×125 мм увеличена с 2,8 до 4 м/мин.

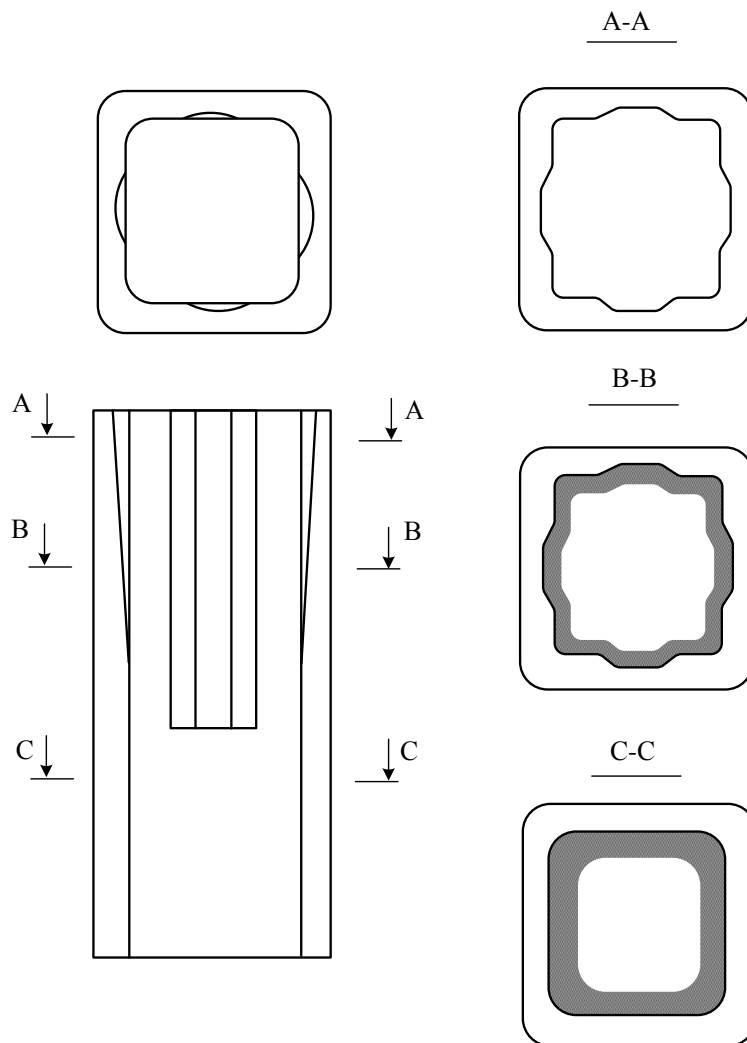


Рис. 7.3. Гильза кристаллизатора конструкции VMS и затвердевание стали в ней

Существенное влияние повышенной конусности узких граней кристаллизатора на образование трещин обнаружили при исследовании на МНЛЗ № 2 завода в Нагое. Было установлено, что при коэффициенте трения 0,1 – 0,3 конусность узких граней кристаллизатора оказалась большей, чем усадка корочки слитка, в результате возникали растягивающие напряжения разливки и при скорости разливки от 1,8 до 2,5 м/мин заготовки были поражены угловыми трещинами. Полностью устранить угловые трещины при разливке особонизкоуглеродистых сталей удалось уменьшением конусности на 30 % и увеличением количества шлакообразующей смеси на 40 %.

С целью повышения скорости разливки фирма «Danieli» на заводе «Феррари Норд» (Италия) установила новый адаптируемый гильзовый кристаллизатор «Данам», что позволило устранить две основные при-

чины, препятствующие увеличению скорости разливки в обычном кристаллизаторе. Одна заключается в образовании воздушного зазора в нижней части медного кристаллизатора из-за его деформации и усадки заготовки. В силу разной теплопроводности по граням и ребрам заготовки образуются воздушные зазоры и в верхней части кристаллизатора (рис. 7.4).

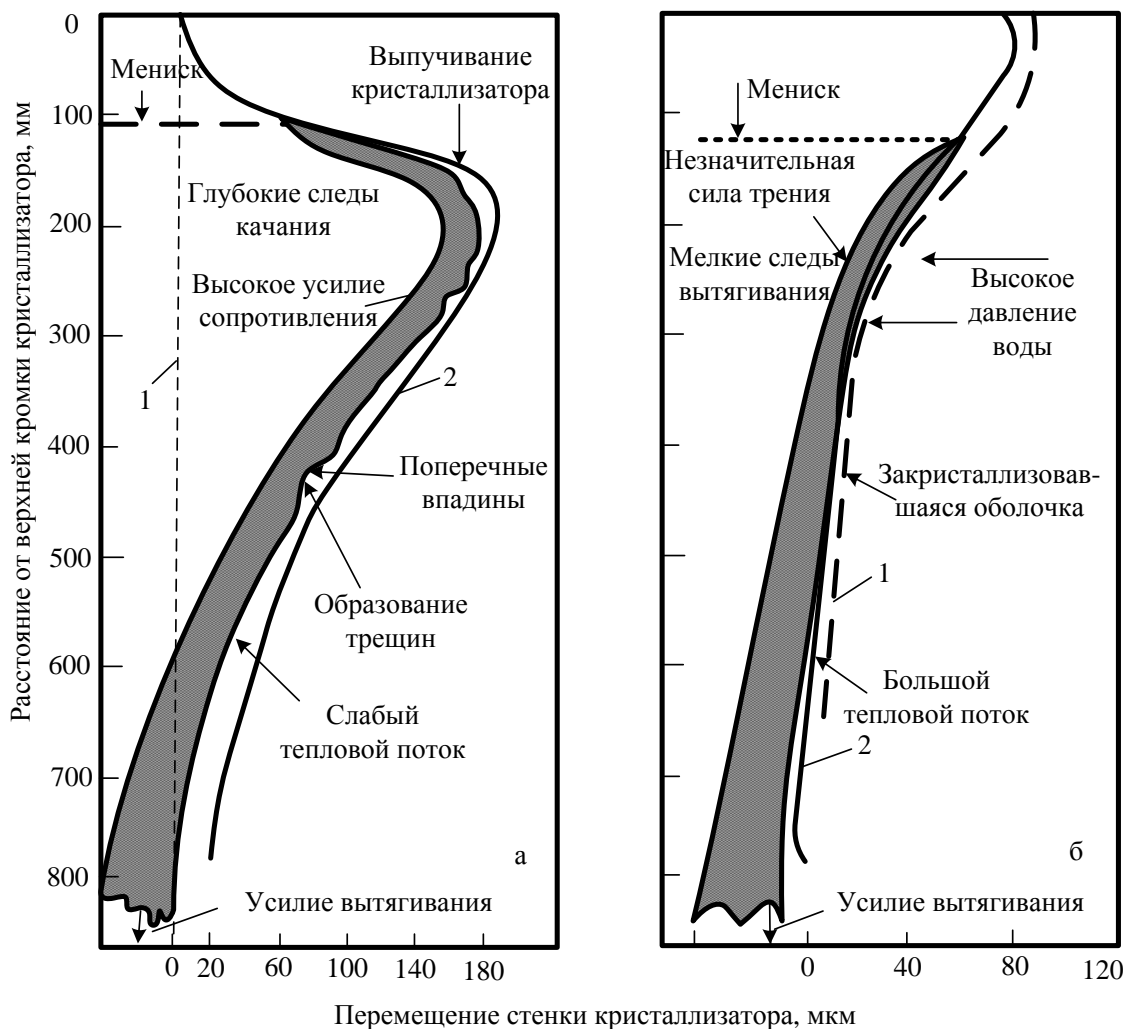


Рис. 7.4. Вид обычного кристаллизатора (а) и кристаллизатора «Данам» (б) в начальном положении (1) и рабочем (2)

Вторая причина заключается в том, что усилие трения между кристаллизатором и заготовкой развивается вблизи мениска, медная гильза из-за температурной разницы между ее горячей и холодной поверхностями выдавливается наружу. Максимальное выдавливание происходит под мениском (рис. 7.4, а). Это способствует развитию более глубоких сле-

дов качания и ведет к росту силы трения между заготовкой и кристаллизатором, которая отрицательно влияет на смазываемость и может привести к образованию поперечных впадин и трещин.

Указанные причины были устранены применением оригинальной конструкции, характеризующейся эластичной деформацией медной гильзы в процессе разливки (рис. 7.4, б).

Кристаллизатор «Данам» способен адаптировать свою изначальную конусность к усадке заготовки. Механическое усилие, необходимое для обеспечения эластичной деформации, создается снаружи давлением охлаждающей воды, оптимизируемым и контролируемым в соответствии с маркой разливаемой стали и скоростью разливки. Эластичная деформация накладывается на исходный параболический конус медной гильзы в холодном состоянии. Давление охлаждающей воды прижимает медную гильзу к заготовке и улучшает контакт между кристаллизатором и заготовкой. Сжимающие усилия, прикладываемые к кристаллизующейся оболочке в процессе движения кристаллизатора вниз, уменьшают глубину следов качания.

Конструкция кристаллизатора «Данам» позволяет также добиться разного охлаждения у ребер и граней в верхней части, гарантирует однородную кристаллизацию оболочки и меньший воздушный зазор по углам.

Во всех современных МНЛЗ поток стали, вытекая из промежуточного ковша, порождает в зоне мениска гидродинамическое турбулентное движение. Поскольку подобная зона расположена в медном кристаллизаторе, турбулентные потоки нарушают начало кристаллизации и ведут к ухудшению качества поверхности и приповерхностной области слитка. К основным, связанным с этим, дефектам относятся: поверхностные трещины из-за гетерогенной теплопередачи, поглощение шлакообразующей смеси, глубокие следы качания и гетерогенная структура кристаллизации.

По результатам измерения вихретоковым уровнемером и данным анализа неравномерности следов качания на боковой поверхности слитка (флуктуации следов качания) были оценены колебания уровня металла в кристаллизаторе и сопоставлены с картиной поверхностных дефектов.

Увеличение индекса флуктуации следов качания сопровождалось значительным усилением продольного и поперечного растрескивания, что позволяет считать колебания уровня в кристаллизаторе одной из причин образования поверхностных дефектов. Эти колебания усиливают разброс позиций начала затвердевания, что приводит к неравномерному затвердеванию на участках с тонкой оболочкой.

В связи с поперечными трещинами предположили, что колебания уровня в кристаллизаторе усиливают эффект давления и изгиба корочки, связанный с качанием кристаллизатора, в этой зоне замедляется кристаллизация и увеличивается глубина складок в следах качания, что приводит к образованию трещин.

Сотрудники фирмы «Ivaco Rolling Mills» провели специальное исследование по выявлению факторов, влияющих на образование поверхностных дефектов в непрерывно-литых заготовках, и установили, что поведение стали на участке около мениска, который является участком начального затвердевания, влияет на формирование следов качания кристаллизатора, причем могут возникнуть многие проблемы (в частности, связанные с заливами). При больших колебаниях уровня стали возникают нерегулярные следы качания кристаллизатора, и смазка на его боковой стенке становится нестабильной, что приводит к изменению глубины следов качания кристаллизатора в соответствии с колебаниями уровня стали. При недостаточной смазке заготовка прилипает к кристаллизатору. Вдвое больший индекс дефектов отмечается в заготовках, отлитых в ручье с нерегулярными колебаниями уровня стали в кристаллизаторе. Эти данные были получены при разливке сталей с содержанием углерода от 0,08 до 0,57 % (поскольку интервал содержания углерода большой, есть основания считать данные надежными).

Связь между началом кристаллизации и возмущениями в мениске является в настоящее время основным ограничителем процесса непрерывной разливки. Поэтому были проведены поиски новых технологических путей для питания кристаллизатора, смещения этого ограничения вперед и повышения таким образом качества продукции непосредственно после отливки. Фирмы CRM и IRSID совместно разработали новую технологию для питания кристаллизаторов вертикальных МНЛЗ, которую назвали «Разливка без мениска». Такая технология направлена на улучшение как поверхности слитка, так и его приповерхностной области.

Основная идея заключалась в таком смещении зоны мениска вверх от зоны кристаллизации, чтобы форма и гидродинамические возмущения в мениске не влияли на кристаллизацию стальной оболочки. При такой концепции огнеупорная питающая насадка для удержания столба жидкой стали расположена выше кристаллизатора (рис. 7.5).

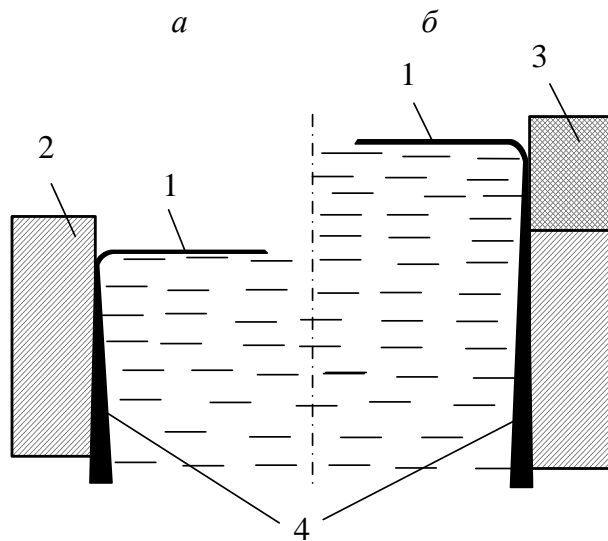


Рис. 7.5. Схема обычного метода питания кристаллизатора вертикальных МНЛЗ (а) и при разливке без мениска (б):
 1 – мениск; 2 – медный кристаллизатор; 3 – огнеупорная питающая насадка;
 4 – закристаллизовавшаяся стальная оболочка

На первом этапе были выполнены разработки в лабораторном масштабе. На втором присоединились два других партнера, объединенные CRM и IRSID: «Allevard Aciers» (Франция) и «Hoogovens» (Нидерланды).

Первая фаза исследований проводилась для определения технологии непрерывной разливки, способной гарантировать хорошее качество поверхности и приповерхностной области продукции на уровне моделирования при стандартных размерах кристаллизатора и скоростях разливки сталей нескольких марок. Исследования с разливкой выполнялись на моделях CRM и IRSID, характеристики которых (использованные на первом этапе) приведены ниже:

Модель	CRM	IRSID
Масса жидкой стали, т	1	6
Размер кристаллизатора, мм	диам.110 155×155	
Металлургическая длина, м	2,7	6,7
Максимальная скорость разливки, м/мин	2,0	3,0

В силу того, что длины разливки обеих моделей незначительны, время разливки составляло от 1,5 до 5 мин в зависимости от скорости разливки. Отливались в основном высокоуглеродистые стали, но экспе-

рименты проводились и с низко- (0,05 % С) и среднеуглеродистой (0,09 – 0,12 % С) сталями. Для высокоуглеродистой стали значительная однородность и воспроизводимая поверхность достигались при скорости 2 м/мин и сечении заготовки 155×155 мм. У двух других видов сталей (средне- и низкоуглеродистой) заготовки получались со значительно лучшей поверхностью в сравнении с обычной разливкой, усадочных дефектов и нахлестов не наблюдалось.

Глубина наблюдаемых на слитках следов качания и разброс вокруг их средних значений (в скобках) после удаления окалина пескоструйной обработкой очень малы:

Разливка	Без мениска Обычная	
Средняя глубина следов качания, мкм, в сталях с содержанием углерода, %:		
0,8	60(35)	200
0,09-0,12	120(50)	400-600
0,05	150(50)	400-600

Структура кристаллизации, получаемая при разливке без мениска, гораздо тоньше, чем после разливки обычным способом, весьма однородна и воспроизводима аналогично поверхности слитка. В случае разливки без мениска расстояние между осями дендритов уменьшено вдоль первых 10 мм от поверхности слитка в полтора раза. Это означает, что скорость кристаллизации гораздо выше не только в начале процесса кристаллизации, но и ниже в кристаллизаторе вследствие того, что ферростатическое давление при разливке без мениска гораздо выше, чем на обычной МНЛЗ. Следовательно, условия теплообмена оказываются более упорядоченными, а контакт между оболочкой и кристаллизатором – более совершенным.

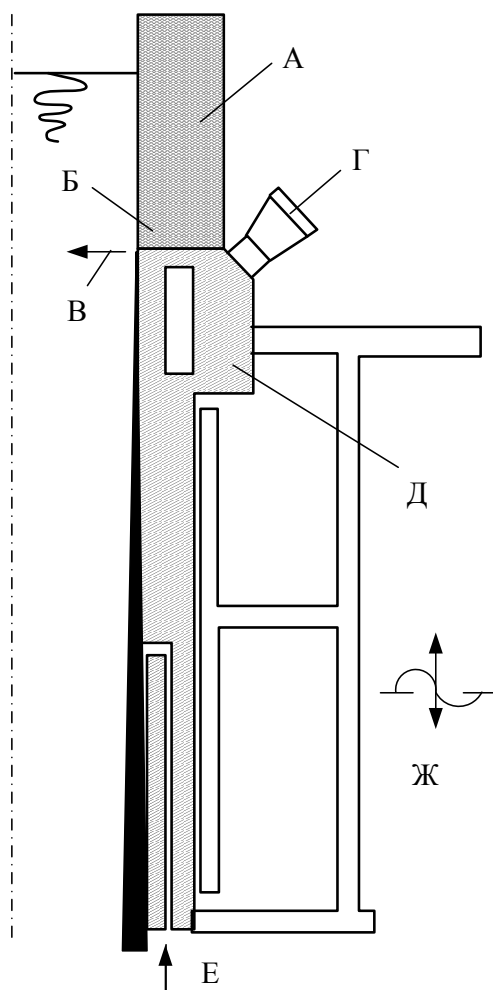
В случае разливки без мениска размер первичного зерна уменьшен в сравнении с обычной разливкой в четыре раза. Данный эффект продолжает наблюдаться на расстоянии 5 мм от поверхности слитка. А поскольку размер зерна уменьшен, границы зерен распределены в структуре более равномерно. Таким образом, уменьшается тенденция к растрескиванию во время горячей прокатки.

Для оценки влияния ферростатического давления на начальную кристаллизацию были исследованы отливки с уровнем мениска в 120 и 250 мм над уровнем кристаллизации сталей двух марок: пружинной (0,6 % С) и для холодной высадки (0,2 % С). Рост ферростатического давления со 120 до 250 мм вызывает значительное улучшение вида поверхности продукции, поверхность отличается большими гладкостью, регу-

лярностью и гомогенностью. Эффект не зависит от марки стали.

Структура кристаллизации также становится более регулярной и гомогенной.

Оптимальная конфигурация кристаллизатора, отработанная в итоге первой фазы исследований, приведена на рис. 7.6.



*Рис. 7.6. Схема кристаллизатора для разливки без мениска
(пояснения в тексте)*

Она содержит: огнеупорную питающую насадку, изготовленную из двух частей: резервуара с жидкой сталью (А) и соединительного кольца (Б); устройство для инъекции газа (В) между огнеупором и медью; источник УЗ-колебаний (Г); усовершенствованную систему охлаждения верхней части медного кристаллизатора (Д); устройства для подачи специальной смазки (Е) и обычного качания кристаллизатора (Ж).

Огнеупорная питающая насадка должна выполнять две функции. Во-первых, она содержит столб жидкой стали, расположенный выше

кристаллизатора (*функция резервуара*). Во-вторых, она должна обеспечивать хорошее *соединение* с медным кристаллизатором. Малый временной интервал между сериями в обычных промышленных МНЛЗ не позволяет использовать подогрев питающей насадки. Поэтому выбранный материал должен обеспечивать очень хорошую тепловую изоляцию вместе с очень хорошей термостойкостью.

Назначение соединительного кольца – исключение всяких возмущений: сталь должна кристаллизоваться в самой верхней части медного кристаллизатора. Кольцом обеспечивается хорошая граница между жидкой и твердой сталью.

Разливка без мениска обеспечивает расположение фронта кристаллизации средствами теплового барьера, характеризуемого тремя моментами:

- огнеупорное соединительное кольцо строго ориентировано по отношению к внутренней поверхности медного кристаллизатора;
- верхняя часть кристаллизатора спроектирована так, чтобы от стали отводился большой тепловой поток, как только она вступит в контакт с данным кристаллизатором;
- между медью и огнеупором инжектируется инертный газ.

Газовая инъекция на границе между медью и огнеупором осуществляется через непрерывные щели, оборудованные между этими двумя материалами. Такая инъекция имеет двойной эффект:

- создает тепловой барьер между медным кристаллизатором и соединительным кольцом;
- «переплавляет» дендриты, пытающиеся расти из верхней части кристаллизатора.

При обычной разливке стальная оболочка начинает кристаллизоваться на уровне мениска. Смазка раздела медь/сталь обеспечивается отложением смазки в мениске. Движение слитка вниз вместе с качанием кристаллизатора производит эффект «насоса», что позволяет перемещать смазку. Подобная технология неприменима для разливки без мениска. В связи с этим было разработано специальное устройство для подачи смазки, при использовании которого смазка:

- впускается примерно на половине высоты кристаллизатора через множество мелких отверстий вдоль горизонтальной линии;
- подается через стенки кристаллизатора;
- проникает в зазор между медным кристаллизатором и стальной оболочкой.

Воздействуя на расход, можно получать некоторый подъем смазки над уровнем инъекции. Силы трения в кристаллизаторе значительно снижаются при инъекции смазки. В данном процессе для того, чтобы

смазывать самый верхний участок в кристаллизаторе, применена технология УЗ-колебаний. В кристаллизаторе на каждой его стороне было установлено по одному источнику УЗ-колебаний. Обычно частота колебаний составляла от 15 до 20 кГц. Амплитуда колебаний вдоль кристаллизатора изменялась от 2 до 8 мкм.

Подобная технология увеличивает теплоотвод от кристаллизатора, повышает стабильность условий кристаллизации и уменьшает силы трения.

Главными задачами второй фазы исследований были преобразование одного ручья МНЛЗ под технологию разлива без мениска и выполнение длительных испытаний. Наиболее важные аспекты второй фазы:

- надежность системы;
- качество продукции, которое должно оставаться высоким в течение всего периода разлива;
- низкие, насколько это возможно, производственные расходы.

Испытания были выполнены на МНЛЗ:

– фирмы «Allevard Aciers» для отливки сортовых заготовок, в основном из пружинных сталей, трехручьевого с размером кристаллизатора 135×135 мм и смазкой маслом. Поскольку МНЛЗ является вертикальной с изгибом, внедрение данной технологии было сравнительно несложным. Максимальное допустимое время разлива составляет 45 мин. Это соответствует опорожнению 40-т ковша при скорости разлива 2 м/мин. Металлургическая длина МНЛЗ позволяла иметь максимальную скорость разлива 2,5 м/мин;

– для отливки сортовых заготовок «Hoogovens» – шестиручьевого, криволинейного типа. Размер кристаллизатора изменяется от 100×100 до 200×200 мм. Смазка маслом или порошкообразной смесью зависит от размера кристаллизатора и марки разливаемой стали. Максимальная скорость разлива составляет до 4 м/мин. Максимальное количество плавок в серии – шесть ковшей.

На МНЛЗ «Allevard» всего было выполнено 11 испытаний. Скорость разлива составляла 2 м/мин, что является средней скоростью для этой установки. Однажды разлили на скорости 2,45 м/мин. Три полных ковша были успешно разлиты без достижения функционального предела новой технологии разлива без мениска. Подтверждено, что продолжительность разлива составляет 45 мин. Отсутствовали химическая коррозия или механическая эрозия огнеупоров (питающая насадка и соединительное кольцо).

Качество поверхности слитка в сравнении с обычной разливкой оказалось значительно выше. Поверхность слитка выглядела более

гладкой, гомогенной и регулярной. Следы качания были практически невидимы. Их глубина составляла менее 50 мкм. Структура кристаллизации также значительно улучшилась. Средние и максимальные значения первичного аустенитного зерна, измеренные параллельно поверхности, уменьшились.

Полученные металлургические результаты доказывают реальность новой технологии разливки без мениска и точно соответствуют результатам, полученным в лабораторных масштабах.

Технология разливки без мениска, совместно разрабатываемая CRM и IRSID, привела к значительному улучшению качества поверхности и приповерхностной области отливаемых заготовок:

- поверхность заготовки оказывается более гладкой, гомогенной и воспроизводимой;
- глубина следов качания уменьшилась;
- уменьшились как расстояние между осями первичных дендритов, так и размер первичного аустенитного зерна.

Данная технология была реализована на промышленной МНЛЗ «Alleward». Для определения условий, при которых будет реализовано промышленное применение, разработки необходимо продолжить. В частности, это включает:

- выполнение более продолжительных испытаний, особенно для других видов сталей;
- исследование технологии при более высоких скоростях разливки;
- подготовку проекта и технического решения, позволяющих быстро устанавливать и демонстрировать данную систему.

Из оригинальных конструкций кристаллизаторов следует отметить кристаллизатор, непосредственно присоединяемый к промежуточному ковшу.

Способ прямого соединения промежуточного ковша с кристаллизатором позволяет подавать расплав на всю площадь сечения слитка и потому пригоден для получения слитков с минимальным припуском на последующую обработку.

На рис. 7.7 показана схема экспериментальной установки.

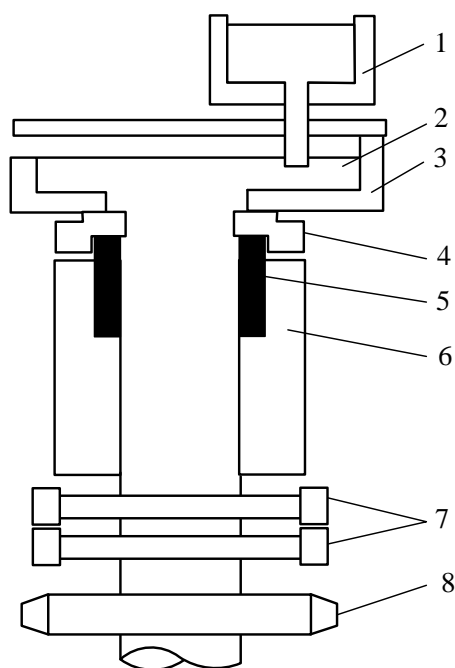


Рис. 7.7. Схема экспериментальной установки: 1 – разливочный ковш; 2 – жидкая сталь; 3 – промежуточный ковш; 4 – питатель; 5 – керамическая вставка; 6 – медный кристаллизатор; 7 – поддерживающие ролики; 8 – тянущие ролики

В водоохлаждаемый медный кристаллизатор помещали керамическую вставку и отливали сляб толщиной 30 и шириной 200 мм. Разливку вели с разными скоростями и режимами вытягивания, затем изучали состояние поверхности и подповерхностную структуру слитков. Кроме того, анализировали температуру вставки кристаллизатора, рассчитывали теплоотвод при кристаллизации, сопоставляли условия теплоотвода и состояние поверхности слитка. Условия проведения экспериментов приведены ниже:

Разливаемый металл	Хромоникелевые стали
Размеры сечения сляба (толщина × ширина), мм	30×200
Перегрев металла, °С	70 – 90
Максимальная скорость разливки, м/мин	1,8

При надлежащем выборе режима разливки получали слитки без следов качания, горячих трещин и других поверхностных дефектов. Температура верхней части керамической вставки в кристаллизаторе оставалась высокой и по всей ширине кристаллизатора превышала 1400 °С.

Используя в качестве параметра температуру керамической вставки, рассчитали позицию начала образования твердой корочки слитка. Она на 20 – 50 мм ниже верхней кромки керамической вставки. Для угловой зоны характерен двухмерный теплоотвод, и металл затвердевает быстрее, чем в средней части широкой грани. Однако в описываемых экспериментах следы качания отсутствовали по всему периметру сечения, и это означает, что твердая корочка формировалась по всему периметру на участке керамической вставки.

7.4. Механизмы качания кристаллизатора

В процессе непрерывной разливки корочка затвердевающего в кристаллизаторе слитка по мере своего движения вниз претерпевает усадку и отходит от стенок. Зона плотного контакта корочки со стенками находится в верхней части кристаллизатора, вблизи зеркала жидкого металла. При определенных условиях в этой зоне происходит прилипание тонкой корочки к стенкам кристаллизатора. Если кристаллизатор будет неподвижным, а слиток будет вытягиваться с постоянной скоростью, то прилипшая корочка останется на месте (явление зависания корочки), а нижняя часть от места разрыва будет двигаться вниз. Когда разрыв достигает нижней кромки кристаллизатора, происходит прорыв – выход жидкой стали из сердцевины слитка. Разливка с повышенной скоростью указала на необходимость создания в корочке металла знакопеременных напряжений, предупреждающих как ее зависание, так и появление поперечных трещин на слитке. Для этого скорость опускания кристаллизатора задается больше скорости движения слитка, создавая так называемое отрицательное скольжение.

Механизмы качания кристаллизатора МНЛЗ радиального типа должны обеспечивать возвратно-поступательное движение кристаллизатора по участку круговой траектории с радиусом, равным радиусу кривизны кристаллизатора, с определенным законом движения и частотой.

Важным требованием к конструкции механизма качания кристаллизатора является получение высокой частоты качаний, которая уменьшает шаг и глубину складок, образующихся на поверхности слитка, ускоряет теплоотвод и снижает неравномерность в нарастании толщины корочки металла. На рис. 7.8 показаны кинематические схемы различных типов механизмов качания кристаллизатора радиальных МНЛЗ. Отличительной особенностью рычажно-кулачкового и рычажно-кулисного механизмов является расположение кристаллизаторов на несущих рамах, качающихся относительно оси, расположенной в центре

кривизны кристаллизаторов. Механизмы не получили широкого распространения вследствие большой длины и массы несущих рам, которые затрудняют доступ со стороны рабочей площадки к механизмам, радиальной части МНЛЗ, изменяют закон движения кристаллизатора, из-за недостаточной своей жесткости не позволяют применять высокую частоту качаний.

Механизм качания кристаллизатора рычажно-кулачкового типа (рис. 7.8, а) с гидроусилителем снабжен кулачковым механизмом управления для создания требуемого закона движения. Достоинством механизма качания такого типа является простой способ получения любого закона движения кристаллизатора путем замены сервокулачка. Механизм не получил широкого применения вследствие повышенной сложности и применения нестандартной гидроаппаратуры управления. В механизме рычажно-кулачкового типа (рис. 7.8, в) кристаллизатор перемещается в роликовых направляющих, что позволяет резко уменьшить длину качающейся рамы и ее массу. Недостатками являются низкая скорость роликовых направляющих и большие зазоры, отрицательно сказывающиеся на процессе разливки. Общим недостатком кулачковых механизмов качания является их быстрый износ.

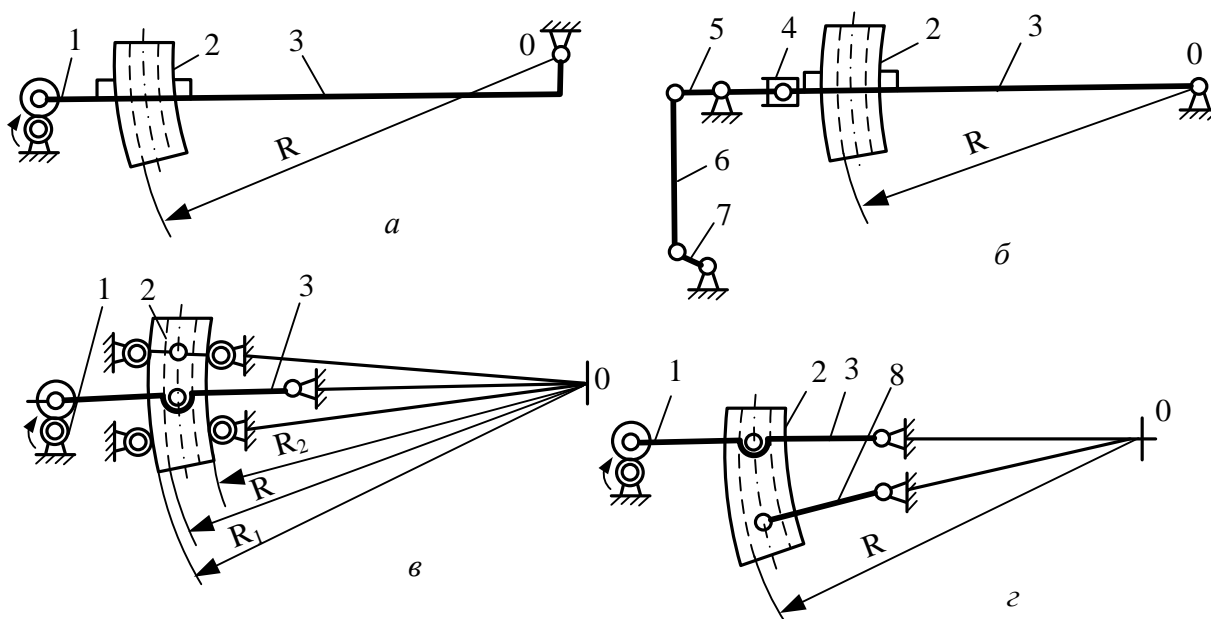


Рис. 7.8. Кинематическая схема механизмов качания кристаллизатора: а – рычажно-кулачковый механизм; б – рычажно-кулисовый механизм; в – рычажно-кулачковый механизм с перемещением кристаллизатора в роликовых направляющих; г – рычажно-кулачковый механизм с приближенным воспроизводством круговой траектории движения кристаллизатора; 1 – кулачковый механизм; 2 – кристаллизатор; 3 – несущая рама; 4 – кулиса; 5 – двуплечный рычаг; 6 – шатун; 7 – эксцентрик; 8 – коромысло

Рычажно-кулачковый механизм с присоединенным шарнирным четырехзвенником (рис. 7.8, з) создает в пределах малых перемещений движения кристаллизатора по траектории, близкой к круговой. Параметры четырехзвенного механизма выбирают таким образом, чтобы отклонение траектории на участке движения кристаллизатора от круговой не превышало допустимой величины по технологическим соображениям. При этом начальное положение четырехзвенника задают так, чтобы направления звеньев – несущей рамы и коромысла – пересекались в центре кривизны кристаллизатора, являющимся одновременно, многовечным центром вращения. Недостатки заключаются в применении кулачкового механизма и расположении опор со стороны стенки кристаллизатора меньшей кривизны, что затрудняет ремонт машин.

Этих недостатков не имеет механизм качания кристаллизатора, приблизительно воспроизводящий круговую траекторию. Этот механизм (рис.7.9) состоит из двух соединенных между собой шарнирных четырехзвенников 9 и 10. Параметры четырехзвенного механизма обеспечивают требуемую точность движения кристаллизатора 11 по круговой траектории при вытягивании слитка 12.

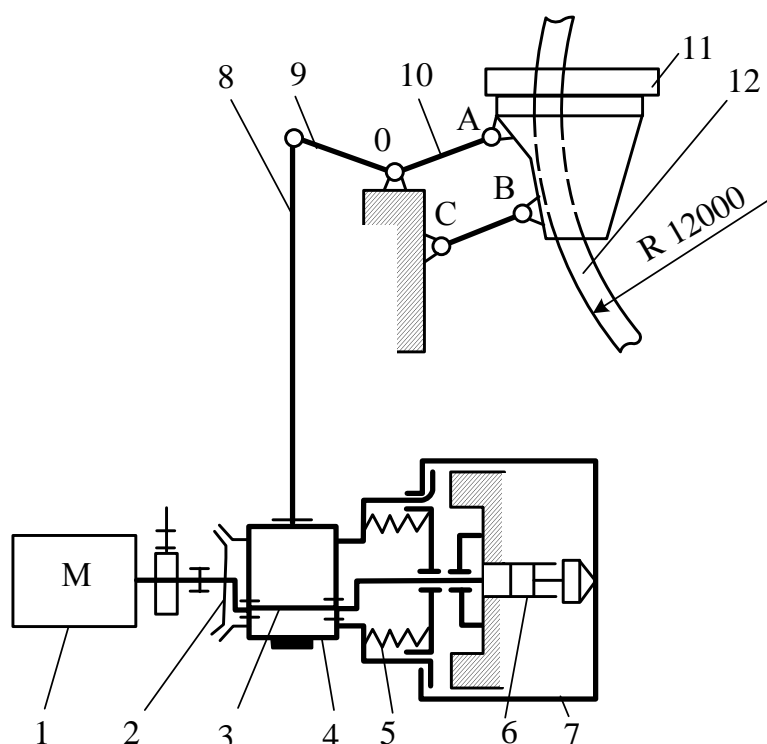


Рис. 7.9. Кинематическая схема механизма качания кристаллизатора с шарнирными четырехзвенниками (OABC)

Качание создается четырехзвенным эксцентриковым механизмом коромыслового типа, эксцентрик (кривошип) 4 которого приводится в движение от электродвигателя 1. Вследствие расположения привода ниже уровня рабочей площадки шатун 8 выполнен удлиненным и в вертикальном положении. На большинстве современных МНЛЗ в механизме применен безредукторный привод с электродвигателем постоянного тока, обеспечивающим регулирование частоты качания кристаллизатора. Применение безредукторного привода обусловлено необходимостью уменьшения зазоров в кинематической цепи от электродвигателя к кристаллизатору, в результате чего уменьшаются удары в соединениях при знакопеременных нагрузках и более точно выдерживается задаваемый закон движения кристаллизатора.

Амплитуду качания кристаллизатора регулируют изменением величины эксцентриситета эксцентрика, поворачивая его относительно эксцентрикового вала 3. В рабочем положении пружины 5 прижимают коническую фрикционную муфту на эксцентрике к полумуфте 2, связанной с эксцентриковым валом, которые вращаются как единое целое.

При регулировании их рассоединяют гидроцилиндром 6, который плунжером перемещает траверсу 7 с тягами, сжимает пружину и отключает фрикционную муфту. Скорость контролируется тахогенератором, соединенным с валом электродвигателя, а эксцентриситет эксцентрика (амплитуда качания) – сельсинами.

7.5. Новые системы качания кристаллизатора

Известно, что качество поверхности непрерывно-литой заготовки и предотвращение прорывов затвердевшей корочки слитка в значительной степени определяются правильностью подбора режима качаний кристаллизатора по частоте, амплитуде, а в новейших моделях – и по асимметрии скоростной диаграммы. Особенно актуальной проблема оптимизации режимов качаний кристаллизатора становится с увеличением скорости литья.

В новейших моделях для высокоскоростного литья используются высокочастотные колебания (до 10 в секунду) кристаллизаторов с большой амплитудой (до 12 мм) и в ряде случаев несимметричные колебания. Такие динамически интенсивные режимы работы удается реализовать только при значительном снижении массы колеблющихся частей (при производстве заготовки сечением не более 150×150 мм и передаче колебаний только медной гильзе).

Широкомасштабная и надежная реализация высокочастотных режимов колебаний на механизмах с жесткими кинематическими звенья-

ми, к которым относятся традиционные кристаллизаторы, отличающиеся сложной кинематической схемой привода качаний с большим количеством массивных передаточных устройств, проблематична.

В традиционных кристаллизаторах велики массы колеблющихся частей, поэтому с увеличением частоты колебаний резко возрастает динамическая нагруженность конструкции.

Основным типом применяющегося до последнего времени механизма является шарнирный четырехзвенник, одно из звеньев которого выполняет функции стола, на который устанавливается и закрепляется кристаллизатор и через который обеспечивается циркуляция охладителя.

В качестве шарнирных элементов в механизмах используют обычные подшипники качения.

В связи с малым углом поворота образуются местные вмятины на дорожках качания колец подшипников. Так, на МНЛЗ Молдавского металлургического завода радиальное биение в шарнирах после шести месяцев работы механизма качания достигает 1 мм. Суммарные зазоры могут достигать величин, соизмеримых с амплитудой качания, которая на современных высокоскоростных МНЛЗ составляет 4 – 5 мм. Износ отрицательно влияет на сохранение требуемого закона качания и приводит к отклонениям движения кристаллизатора от заданной траектории в поперечном направлении. Все это усугубляется знакопеременными нагрузками, особенно при высокой частоте качания.

Указанные факторы отрицательно сказываются на качестве наружной поверхности заготовки, стабильности процесса непрерывного литья и стойкости гильз кристаллизаторов.

Для устранения этих недостатков в последнее время практически все ведущие фирмы ведут поиски конструкции беззазорных механизмов качания. Рычаги с подшипниковыми шарнирами заменяют плоскими рессорными элементами, в которых тот же эффект взаимного перемещения достигается не трением, а упругой деформацией (например, механизмы качания МНЛЗ Уралмашзавода, «Voest-Alpine», «Mannesmann-Demag» и др.). Работы в этом направлении в течение ряда лет проводили сотрудники ВНИИМЕТМАШ на МНЛЗ Молдавского металлургического завода.

В качестве привода механизма качания применяют электродвигатели либо гидравлические устройства. Впервые гидроусилитель с задающим кулачковым сервоприводом для привода механизма качания конструкции ВНИИМЕТМАШ успешно применен на первой промышленной МНЛЗ Руставского металлургического завода в 1965 г. Впоследствии от гидропривода отказались из-за низкого качества гидроаппара-

туры. В последнее время для привода вновь находят применение специальные гидравлические устройства, которые позволяют в широких пределах изменять закон качания, амплитуду и частоту непосредственно в процессе литья. В этом направлении работают фирмы «Paul Wurth», «Mannesmann-Demag», «Voest-Alpine Industrieanlagenbau».

Основными технологическими параметрами механизма качания являются взаимосвязанные величины амплитуды и частоты качания. Практика показывает, что качество поверхности заготовок связано с указанными параметрами. Характерная складчатость – следы качания – уменьшаются с увеличением частоты и уменьшением амплитуды качания кристаллизатора

Впервые использовали гидравлическое устройство качания кристаллизатора с пластинчатыми пружинами на фирме «Salzgitter AG». Характеристики качания заметно улучшились в связи с уменьшением массы качающихся деталей на 50 %. Сообщили, что доля слябов с поперечными трещинами уменьшилась с 75 до 55 %.

Дальнейшие разработки в этой области и организация серийного производства для модернизации существующих и при строительстве новых МНЛЗ были обеспечены фирмой «Voest-Alpine Industrieanlagenbau».

Первое гидравлическое устройство качания кристаллизатора типа «Динафлекс», поставленное фирмой «Voest-Alpine Industrieanlagenbau», было введено в эксплуатацию на заводе фирмы «Armco» в Мэнсфилде в 1995 г.

Основные характеристики устройства: оперативное регулирование хода, частоты и кривой качания кристаллизатора; износостойкие направляющие на пластинчатых пружинах, для которых не характерен «мертвый ход» (рис. 7.10); небольшие массы качания для обеспечения работы без резонанса при компенсации массы с помощью цилиндрических пружин для уменьшения усилий цилиндров; гидравлический привод качания; автоматическое подключение энергоносителей.

Устройство «Динафлекс» позволяет улучшить качество сляба особенно при разливке с малой скоростью и уменьшить глубину следов от качания кристаллизатора. Эксплуатационная надежность при больших скоростях разливки также улучшается благодаря большему расходу разливочного порошка и, следовательно, снижению риска образования прорывов. Перечисленные преимущества достигаются использованием разных режимов качания кристаллизатора.

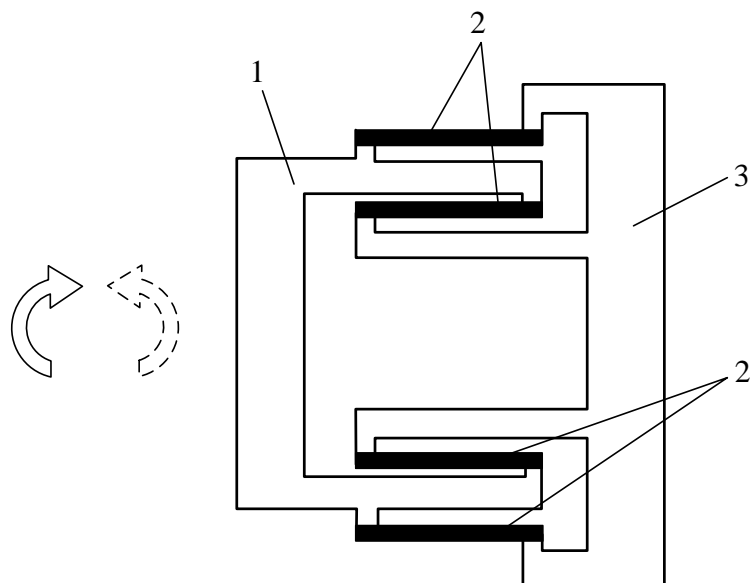


Рис. 7.10. Каскадная система направляющих на пластинчатый пружинах, не подверженных износу: 1 – поддерживающая рама качающегося кристаллизатора; 2 – каскадные пластинчатые пружины; 3 – опорная рама

Была обеспечена оптимизация основания устройства качания кристаллизатора и его подъемного стола, что позволило резко уменьшить массу этого устройства и получить больше пространства для системы электромагнитного торможения потока стали.

Основные преимущества, связанные с использованием гидравлического устройства качания кристаллизатора: полностью динамическое регулирование шага, частоты и характера качания кристаллизатора в процессе непрерывной разливки; повышение качества поверхности продукции и надежности работы оборудования, выражаемое в меньшем количестве прорывов стали.

Уникальной используемой со времени ввода в эксплуатацию установки непрерывной разливки на заводе фирмы «Armco» в Мэнсфилде является так называемая практика инвертированного регулирования частоты, когда амплитуда качания кристаллизатора увеличивается, а частота уменьшается с увеличением скорости разливки.

При использовании практики инвертированного регулирования частоты качания поддерживается малое и относительно постоянное время движения заготовки с отставанием по отношению к движению кристаллизатора в стабильном интервале качания кристаллизатора. Но при этом увеличивается время движения заготовки с опережением по отношению к движению кристаллизатора в процессе его качания.

При движении заготовки с опережением по отношению к движению кристаллизатора в случае повышения скорости разливки обеспечи-

вается усиленный расход шлакообразующей смеси там, где это более всего необходимо.

После успешного освоения устройств «Динафлекс» на слябовых установках фирма разработала аналогичные устройства для блюмовых и сортовых установок.

В связи с ограниченным имеющимся пространством «Voest-Alpine Industrianlagenbau» создала в настоящее время новое устройство качания, которое направляется безызносными пружинами, смонтированными только с одной стороны подъемного стола.

Первое гидравлическое устройство качания кристаллизатора с его новыми приспособлениями ввела в эксплуатацию фирма «Lech Stahlwerke» в декабре 1997 г. на МНЛЗ в заготовки квадратного сечения.

Устройство качания кристаллизатора «Динафлекс», оснащенное системой направляющих на пластинчатых пружинах и гидравлическим приводом, было установлено на одной из МНЛЗ в сортовые заготовки. Эксплуатация в течение года убедительно продемонстрировала преимущества механизма. Позднее, в январе и мае 2000 г., устройства качания кристаллизатора были установлены еще на двух МНЛЗ. В результате достигнуто значительное улучшение качества продукции и эксплуатационных характеристик МНЛЗ, а также сокращение затрат на профилактическое обслуживание.

Жидкую сталь на предприятии разливают на двух-, четырехручьевых МНЛЗ на заготовки сечением от 115×110 до 200×200 мм в режимах открытой струи и с погружным стаканом. Сортамент охватывает более 3000 сталей – от конструкционных до высококачественных, таких как стали для холодной высадки, подшипниковые и инструментальные, содержащие до 1,5 % углерода.

Потребители продукции «Lech Stahlwerke» – европейские автомобилестроители и поставщики автомобильных деталей, например компании «Audi», BMW, «Deimler-Kreisler», «Ford», «Opel», «Volkswagen» и «Zimmerat Fabrik», а также производители подшипников.

До модернизации МНЛЗ на качество продукции неблагоприятно влияло оборудование механизма качания кристаллизатора. Изменение хода качания при переходе с режима с открытой струей на режим использования разливочных порошков требовало остановки агрегата на 1,5 ч. Кроме того, поломка направляющих приводила к прорывам и незапланированным простоям.

Работа новых направляющих на пластинчатых пружинах характеризовалась высоким уровнем. При высоте хода 5 мм и частоте 5 ходов в секунду горизонтальные отклонения составили всего 0,06 мм. Этот высокий стандарт точности поддерживался в течение двух лет без профи-

лактического обслуживания, за исключением замены гидравлического цилиндра, который был залит сталью из кристаллизатора.

Сравнение сортовых заготовок, полученных при использовании электромеханического механизма качания рычажного типа и опытной установки, показало значительное улучшение качества их поверхности, особенно по глубине следов от качания кристаллизатора. Качество продукции было устойчивым в течение всего периода испытаний. Большой вклад в улучшение качества поверхности внесла легкость оперативного регулирования хода.

Результаты испытаний в течение двух лет показали, что система направляющих на пластинчатых пружинах не требует профилактического обслуживания; не наблюдалось механических и электрических неполадок; улучшилось качество поверхности сортовой заготовки; улучшились эксплуатационные характеристики агрегата в результате уменьшения объема профилактического ухода, дистанционного регулирования хода и внедрения системы направляющих на пластинчатых пружинах; не было прорывов металла из-за качания кристаллизатора.

После работы механизма «Динафлекс» на МНЛЗ № 2 в течение года затраты на профилактическое обслуживание и ремонт уменьшились на 70 %. Был проведен только один ремонт из-за перелива жидкой стали в кристаллизаторе. Агрегат не останавливали для замены подшипников, регулировки хода качания и других операций.

Улучшение качества определяли по результатам оценки прокатанной продукции циркографом. Данные, например, для проката высококачественных сталей диаметром 30 – 60 мм из заготовок сечением 170×170 мм показали уменьшение брака в 1999 г. на 36 % по сравнению с данными за 1998 г. (100 %).

Еще одной разработкой фирмы VAI является кристаллизатор с регулируемой с помощью гидравлики шириной «Гидровам», обеспечивающий большую точность регулирования по сравнению с электромеханическими системами, размещаемый на меньшей площади и требующий меньшего профилактического ухода.

Характеристики и преимущества «Гидровам»: высокоточное и высокопроизводительное регулирование ширины кристаллизатора, рекомендуемые скорости регулирования составляют 500 мм/мин на каждой стороне в холодном состоянии и 50 мм/мин в процессе разлива; высококомпактные гидравлический цилиндр и устройство управления особенно пригодны для модернизации действующих кристаллизаторов, в большинстве случаев узкие грани могут быть использованы повторно; используются только типовые гидравлические компоненты, поэтому детали систем управления действующих электромеханических устройств

могут быть встроены в кристаллизатор «Гидровам».

Все гидравлические компоненты системы являются стандартными промышленными деталями, т.е. она может быть приведена в движение любой гидросистемой. Каждый цилиндр снабжен встроенным датчиком положения и распределительным клапаном для плавного движения. Используемая электрическая система управления хорошо зарекомендовала себя и обеспечивает необходимые режимы регулирования.

Особое внимание уделялось надежности системы. В процессе регулирования или изменения положения цилиндра кристаллизатор поддерживается только гидравлическим давлением. Программное обеспечение управления включает стандартные программы по отработке погрешностей во избежание прорывов и способствует восстановлению конфигурации системы, чтобы в случае возникновения нештатных ситуаций можно было освободить сталеразливочный ковш. В течение четырех суток было выполнено 30 регулировок в соответствии с требованиями технологии без задержки производственного процесса. Наиболее существенной регулировкой явилось изменение ширины сляба на 250 мм на длине 7,54 м. Механическое устройство регулирования, которое ранее применялось SSAB, обеспечивало максимальное изменение ширины сляба 110 мм на длине 11 м.

На предприятии «SSAB Tunyplatt» (Швеция) на слябовых МНЛЗ криволинейного типа системы «Динафлекс» и «Гидровам» были введены в эксплуатацию в июле 2000 г. Результаты измерений, выполненных на механическом устройстве качания и на устройстве «Динафлекс», показали улучшение точности перемещения стола кристаллизатора на 30 – 70 %. Применение «Динафлекс» уменьшило в среднем на 30 % глубину следов от качания кристаллизатора на узких гранях слябов. После модернизации МНЛЗ объем работы по профилактическому уходу за оборудованием также значительно уменьшился. Например, при работе прежнего устройства качания необходимо было через каждые полгода останавливать машину для профилактического ремонта.

Использование для регулирования ширины кристаллизатора системы «Гидровам» дало следующие результаты: сокращение затрат на профилактический уход на 90 %; увеличение службы узких сторон кристаллизатора на 100 % (возможно увеличение на 230 %); уменьшение замены узкой стороны на 50 %; увеличение скорости регулирования до 50 мм/мин при максимальной скорости разливки 1,55 м/мин; увеличение производительности и выхода годного.

К 2001 г. системы качания кристаллизатора «Динафлекс» были установлены на 24 МНЛЗ: «AC Steel Mensfield», «Northwestern Steel and Winer Bethlehem Steel», IPSCO (США); «Dofasco» (Канада); «Imеха»

(Мексика); «CSN Kosipa» (Бразилия); «Lech-Stahlwerke» (Германия); «Vest-Alpine Stahl Linz und Donawitz» (Австрия); «Walbruna Luccini Ilwa» (Италия); «Nova Huta» (Чешская Республика); «Rautaruuki» (Финляндия); «SSAB Tunuplatt» (Швеция); «Мааншань», «Виско», «Аньян» (КНР); «Накаяма» (Япония); «Перкаса» (Индонезия).

Установки «Гидролам» работают на предприятиях: «Vest-Alpine Stahl Linz» (МНЛЗ № 5, Австрия); «SSAB Tunuplatt» (МНЛЗ № 4,5, Швеция); «Ilwa» (МНЛЗ № 1 и 2, Италия); «Outocumpu» (Финляндия).

Две слабовые установки фирма VAI поставила для замены старых вертикальных установок в цехе № 1 ОАО НЛМК.

7.6. Конструктивные особенности кристаллизатора для отливки сортовых заготовок и блюмов

Разливка стали в кристаллизаторы квадратного сечения производится с более высокими скоростями вытягивания по сравнению с отливкой плоских заготовок той же толщины. К конструкции кристаллизаторов для отливки сортовых заготовок и блюмов предъявляют жесткие требования. Чем меньше поперечное сечение заготовки, тем выше скорость вытягивания и меньше допуски на прямолинейность рабочей полости кристаллизатора в продольном направлении. Ниже приведены сечения кристаллизаторов и допуски на прямолинейность рабочих стенок:

Сечение кристаллизатора, м	0,10×0,10	0,15×0,15	0,20×0,20
Допуски на прямолинейность рабочей полости, м	$\pm(0,8-0,1) \cdot 10^{-3}$	$\pm 0,15 \cdot 10^{-3}$	$\pm 0,20 \cdot 10^{-3}$
Сечение кристаллизатора, м.	0,25×0,25	0,30×0,30	
Допуски на прямолинейность рабочей полости, м.	$\pm 0,25 \cdot 10^{-3}$	$\pm 0,25 \cdot 10^{-3}$	

Как на вертикальных, так и на криволинейных МНЛЗ при отливке квадратных заготовок сечением до 0,20×0,20 м применяют тонкостенные гильзовые кристаллизаторы с толщиной стенки гильзы $(7-19) \cdot 10^{-3}$ м. На рис. 7.11 показан кристаллизатор с рабочими стенками из цельнотянутой медной гильзы длиной 0,8 м. Гильза, имеющая толщину стенки $7 \cdot 10^{-3}$ м и размеры внутренней полости 0,082×0,082 мм, жестко закреплена на фланце в верхней части кристаллизатора, а по всей длине свободно вставлена в его конус. Нижняя часть гильзы зафиксирована в корпусе при помощи уплотнителя, обеспечивающего возможность ее удлинения при нагреве в процессе разливки, что уменьшает деформа-

цию гильзы. Стойкость таких кристаллизаторов в три раза выше стойкости кристаллизаторов с креплением гильзы к корпусу при помощи шпилек.

Блочный кристаллизатор сечением $0,20 \times 0,20$ м, представляющий собой толстостенную медную гильзу диаметром $0,36$ м, прикрепленную шпильками к цилиндрическому корпусу, представлен на рис. 7.12. В стенках гильзы имеются каналы для охлаждающей воды, просверленные на расстоянии $15 \cdot 10^{-3}$ м от рабочей поверхности. Недостатками этого кристаллизатора являются сложность изготовления, высокий расход меди и невозможность сохранения его рабочей полости после ремонта стенок.

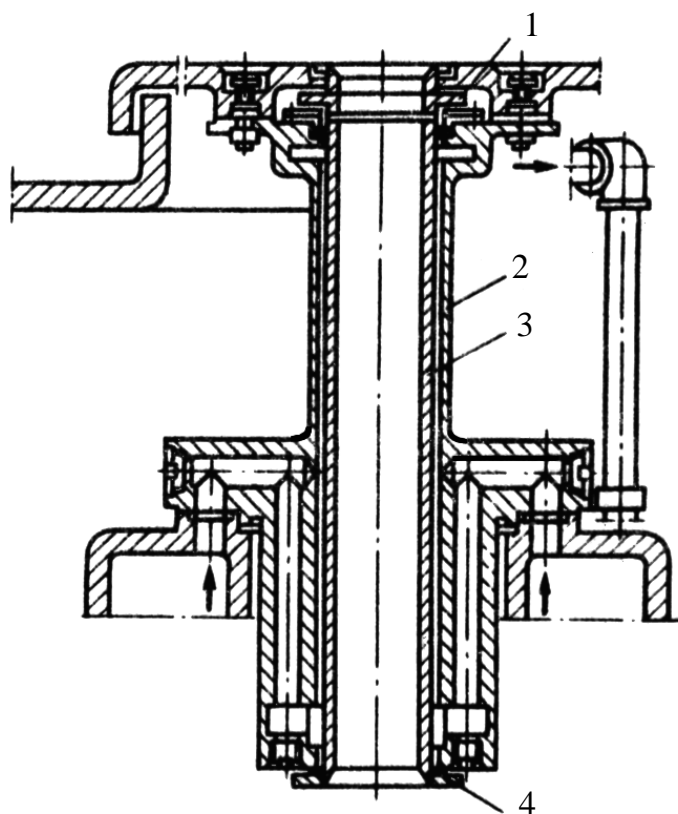


Рис. 7.11. Тонкостенный гильзовый кристаллизатор: 1 – фланец; 2 – корпус кристаллизатора; 3 – гильза; 4 – уплотнение

При отливке крупных сортовых заготовок сечением более $0,20 \times 0,20$ м используют толстостенные сборные кристаллизаторы. Рабочая полость толстостенного сборного кристаллизатора собирается из медных стенок толщиной $0,06 - 0,07$ м, связанных болтами с опорными плитами, которые соединены траверсами. Поскольку конструкции тол-

стостенных кристаллизаторов сечением $0,20 \times 0,20$ м и более аналогичны, рассмотрим кристаллизатор сечением $0,25 \times 0,25$ м (рис. 7.13), собранный из четырех стенок с усиками шириной $5 \cdot 10^{-3}$ м на узких стенках. Рабочая длина кристаллизатора 1,20 м. В медных стенках толщиной 0,055 м через каждые 0,050 м просверлены каналы диаметром 0,020 м для охлаждающей воды. Расстояние от рабочей поверхности медных стенок до водяных каналов составляет 0,025 м. В верхней и нижней частях кристаллизатора продольные водяные каналы соединены поперечными. Медные стенки крепят к стальным стенкам корпуса шпильками. Тепловое расширение рабочих стенок кристаллизатора стало возможным благодаря увеличенным зазорам между шпильками и отверстиями в стальных стенках, а расширение узких стенок компенсировалось тарельчатыми пружинами под гайками стяжных болтов. Таким образом, при отливке сортовых заготовок малого сечения (до $0,15 \times 0,15$ м) целесообразно использовать толстостенные гильзовые кристаллизаторы со свободно подвешенной гильзой; при отливке блюмов сечением $0,20 \times 0,20$ м – толстостенные гильзовые кристаллизаторы с жестко закрепленной гильзой или толстостенные сборные кристаллизаторы; при отливке блюмов сечением $0,25 \times 0,35$ м – толстостенные сборные кристаллизаторы со сверленными каналами.

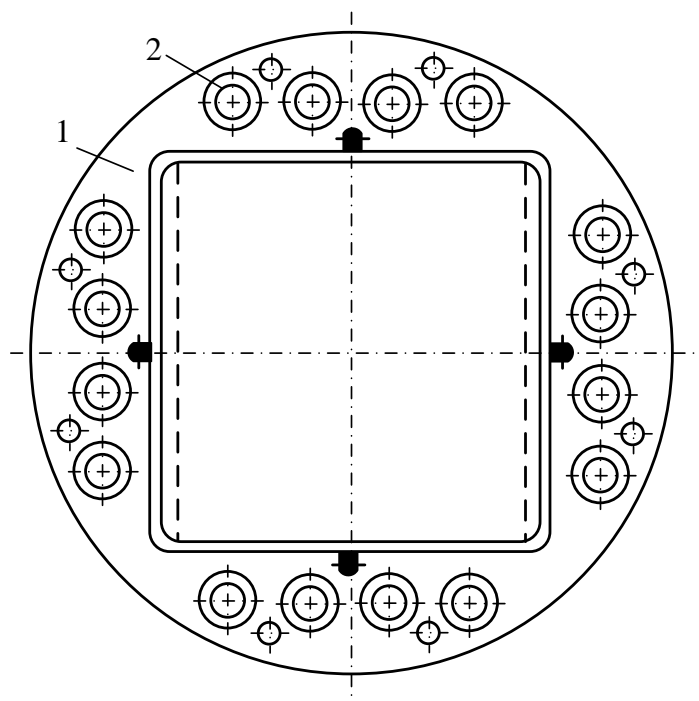


Рис. 7.12. Блочный кристаллизатор:
1 – медная гильза; 2 – каналы для охлаждающей воды

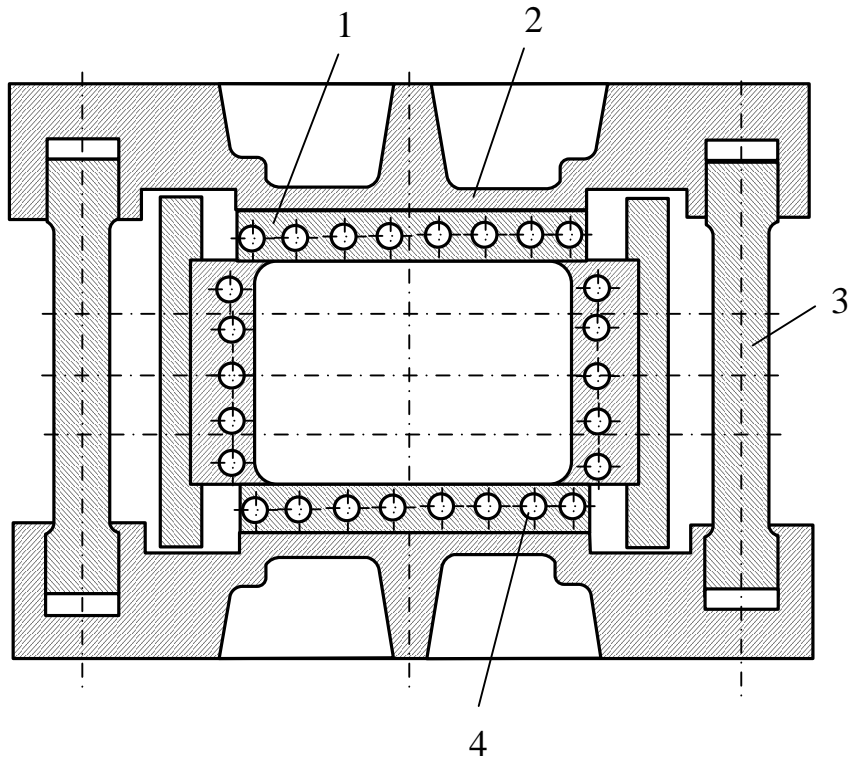


Рис. 7.13. Толстостенный сборный кристаллизатор: 1 – медная стенка; 2 – опорная стальная плита; 3 – траверса; 4 – каналы для охлаждающей воды

Основной причиной выхода из строя кристаллизаторов для отливки сортовых заготовок и блюмов является деформация их рабочих стенок. В процессе эксплуатации кристаллизаторов в верхней их части происходит утяжка стенок, а направление конусности изменяется на обратное. На рис. 7.14 показано изменение конусности в кристаллизаторе, а на рис. 7.15 – постепенное изменение размеров рабочей полости кристаллизатора на двух уровнях, отстоящих от верхнего торца кристаллизатора на 0,177 (1) и 0,584 м (2). В первом уровне, находящемся на 0,76 м ниже зеркала, наблюдаются максимальные тепловые потоки и наибольшая утяжка стенок; во втором уровне происходит расширение рабочей полости кристаллизатора. Утяжка стенок вызвана высокими термическими напряжениями, превосходящими предел текучести, возникающими в стенках в зоне зеркала. Выбор новых материалов рабочих стенок сортовых кристаллизаторов, имеющих повышенную стойкость, осуществляют по тем же принципам, что и выбор материалов стенок слябовых кристаллизаторов.

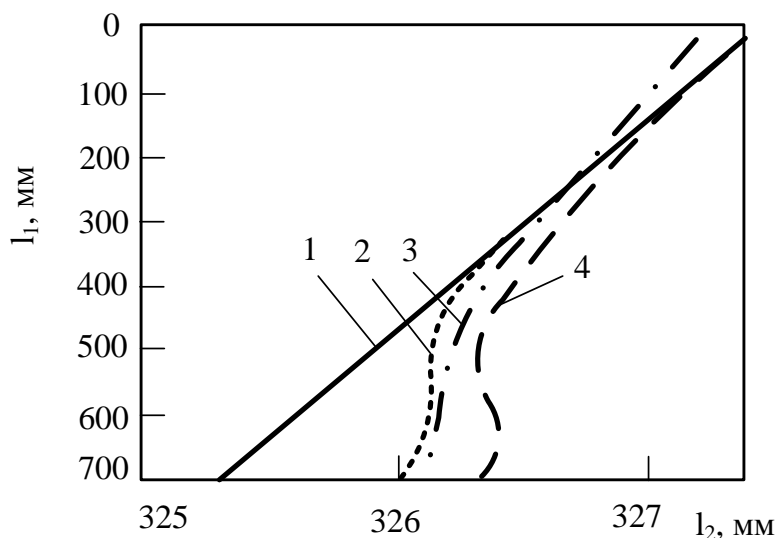


Рис. 7.14. Изменение конусности стенок кристаллизатора:
 1 – первоначальная конусность; 2 – после разливки 25 плавов;
 3 – после разливки 50 плавов; 4 – после разливки 80 плавов

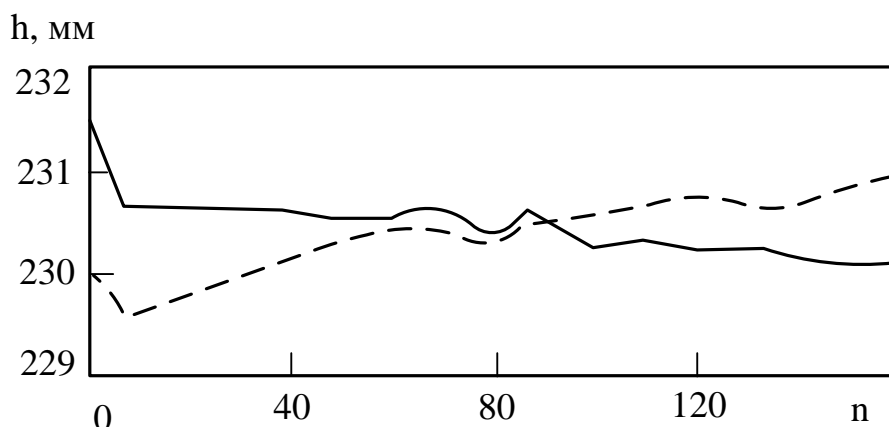


Рис. 7.15. Изменение размеров рабочей полости кристаллизатора
 в зависимости от числа плавов

7.7. Уход за кристаллизатором и смазка стенок

После разливки каждой плавки (серии плавов) производится замер шва между узкой и широкой гранями. Если величина зазора более $(0,3-0,4) \cdot 10^{-3}$ м, то следует уменьшить его специальной гладилкой. Истирание плит узких граней определяется специальной линейкой. Если истирание более $1,5 \cdot 10^{-3}$ м, то кристаллизатор не подлежит дальнейшей эксплуатации, а плиты узких граней в специальных механических мастерских заменяют на новые.

Истиранию подвергается, главным образом, околоромочная нижняя зона плиты (рис. 7.16). Ввиду того, что максимально допустимое истирание составляет $1,5 \cdot 10^{-3}$ м, срок службы узких граней для слябовых МНЕС составляет 70 – 80 плавов. Кромки плит узких стенок с износом $1,5 \cdot 10^{-3}$ м наплавляют, а затем фрезеруют на размер и снова устанавливают. Такой способ ремонта плит позволяет использовать их 15 – 20 раз, что дает возможность разливать около 1000 плавов.

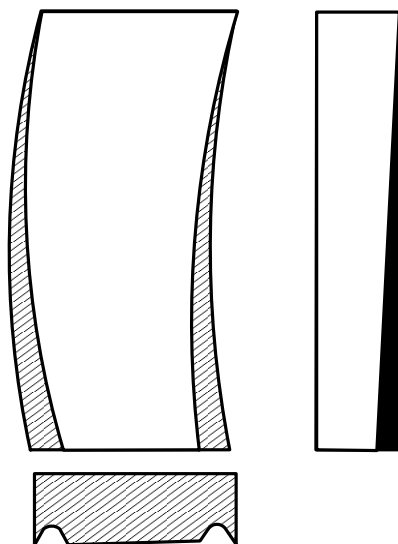


Рис. 7.16. Характер износа узких стенок кристаллизатора

Геометричность широких граней проверяется один-два раза в неделю в направлении подачи струи металла радиусным шаблоном. Кроме того, измеряют внутреннюю толщину кристаллизатора по трем уровням, сверху вниз. Если отклонение от заданного размера хотя бы на одном уровне превышает $1,0 \cdot 10^{-3}$ м, то широкие грани идут на обработку.

При сильных местных повреждениях плит в зоне зеркала, например при образовании рисок глубиной $1,5 \cdot 10^{-3}$ м, кристаллизатор подлежит замене, а плиты – последующей наплавке и механической обработке. Смазка рабочих поверхностей кристаллизатора парафином, минеральными маслами или за счет шлакообразующих смесей необходима для уменьшения трения корочки слитка о стенки кристаллизатора и предотвращения зависания его в процессе разливки. Смазка позволяет повысить скорость разливки. Кроме того, при сгорании смазки в полости кристаллизатора образуется восстановительная атмосфера, которая в известной мере препятствует окислению металла на зеркале и тем самым улучшает его качество.

7.8. Системы подачи флюсов в кристаллизаторы

Синхронно со стопорами промежуточного ковша работают те или иные системы (часто черпаками вручную) подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы, от надежности и устойчивости работы которых во многом зависит качество, прежде всего, поверхности заготовки.

Нестабильные условия подачи смеси приводят к возникновению ряда проблем (таблица 7.1), во избежание которых необходимо поддерживать постоянный, обеспечивающий устойчивое состояние мениска слой смеси.

Считается, что для этого достаточно, чтобы толщина нерасплавленного слоя смеси составляла 50 мм. На заводе фирмы «Stelco» в Хилтон Уоркс был введен в строй уникальный автоматический питатель, отличающийся высокими характеристиками текучести и низким запылением при подаче гранулированных шлакообразующих смесей.

Как правило, на 1 т разлитой стали расходуется 0,5 кг шлакообразующей смеси. У обычной слябовой МНЛЗ расход смеси составляет от 1,5 до 2,5 кг/мин. Для обеспечения стабильного состояния разливки подавать смесь малыми дозами вручную затруднительно. Автоматический же питатель, поддерживающий постоянный расход смеси, обеспечит постоянные характеристики расплавленной смеси в кристаллизаторе и, следовательно, уменьшит вероятность возникновения проблем с эксплуатацией оборудования и качеством продукции.

Попытки создать автоматизированную, с механическими и техническими устройствами подачу смеси предпринимались с ограниченным успехом и ранее.

Требования к гравитационному питателю включают достаточную высоту, необходимую для обеспечения потока в кристаллизатор, наличие большого бункера с каждым видом смеси и жесткого трубопровода для поддержания углов распределения. Такая система отличается простотой, однако ей сопутствует ряд проблем. Систему такого типа нельзя установить вблизи от кристаллизатора. Расположение МНЛЗ и конструкция промежуточного ковша не обеспечивают необходимого вертикального пространства для адекватного угла подачи смеси. Жесткий трубопровод затрудняет манипулирование операторов и создает риск возникновения опасной ситуации. Бункер смеси обычно заполняется вручную или с помощью крана, а это снижает эффективность автоматизированной подачи.

Таблица 7.1

Нестабильные условия разливки при отклонениях в подаче смеси

Характер разливки	Проблемы	Последствия
Тонкий слой нерасплавленной смеси	Недостаточная теплоизоляция, приводящая к пониженному образованию гарниссажа, большого серпа мениска, возникновению захлаживания стали в кристаллизаторе, открытию стали для контакта с воздухом	Недостаточная смазываемость, ведущая к прорывам, проблемы качества, связанные с глубокими следами качания, вторичное окисление стали
Избыточное введение смеси	Поглощение шлака сталью, деформация мениска, науглероживание стали, неравномерное расплавление	Провоцирование прорывов, образование шлакового кольца, следов качания с отклонениями
Неравномерная подача смеси	Меняющаяся теплоизоляция, ведущая к неустойчивому образованию шлака, его переменному составу за счет поглощения включений, образование жгута и неоднородного мениска	Образование жгута, ведущее к прорывам, малая толщина расплавленной смеси, ведущая к пригоранию и прорывам, изменяющийся состав расплавленной смеси, приводящий к колебаниям свойств гарниссажа и влияющий на теплоотвод, а также ухудшение качества продукции, связанное со следами качания

Механическая подача смеси обычно выполняется конвейером шнекового типа. Такой способ позволяет точно регулировать расход смеси. Обычно для распределения смеси и обеспечения надлежащего покрытия в кристаллизаторе – подачи смеси в слябовый кристаллизатор в нескольких точках необходимо несколько таких питающих устройств или же несколько подвижных трубопроводов.

Такую систему для ограничения длины шнекового механизма следует устанавливать вблизи от кристаллизатора, и часто ее монтируют на крышке над кристаллизатором. Операторам необходимо заполнять небольшие бункера, и большой расход смеси невозможно обеспечить. Доступ к кристаллизатору из-за таких питателей ухудшается.

Наряду с этим для подачи шлакообразующей смеси была использована и портативная пневматическая система, в которой смесь перемещается в кристаллизатор с помощью импульсов сжатого воздуха, при этом создается расслоение материала, а также запыление. Усложненный бункер и система трубопроводов (относительно других систем) значительно дороже. Кроме того, для поддержания работоспособности системы требуется интенсивное обслуживание.

Питатель на заводе фирмы «Stelco» был разработан с учетом следующих критериев: низкая стоимость, высокая надежность, продолжительный срок службы, возможность легкой подачи смеси, использование для уменьшения отходов больших бункеров, а также удобство пользования. Схема системы подачи приведена на рис. 7.17.

Для транспортировки смеси из большого бункера на разливочную площадку была использована промышленная вакуумная система.

Такой выбор основан на том, чтобы система была компактна, а переход с одной смеси на другую – несложен. В любой момент во время работы в системе находится небольшое количество материала (примерно 18 кг) и его можно быстро заменить. Система обслуживается пневматически с самоочищающимися фильтрами, в ней отсутствуют подвижные части, что делает ее весьма надежной и чистой. Через регулируемый интервал времени устройство переключается на вакуумный режим для засасывания смеси из большого в небольшой промежуточный бункер, откуда с использованием датчика уровня смесь подается в кристаллизатор.

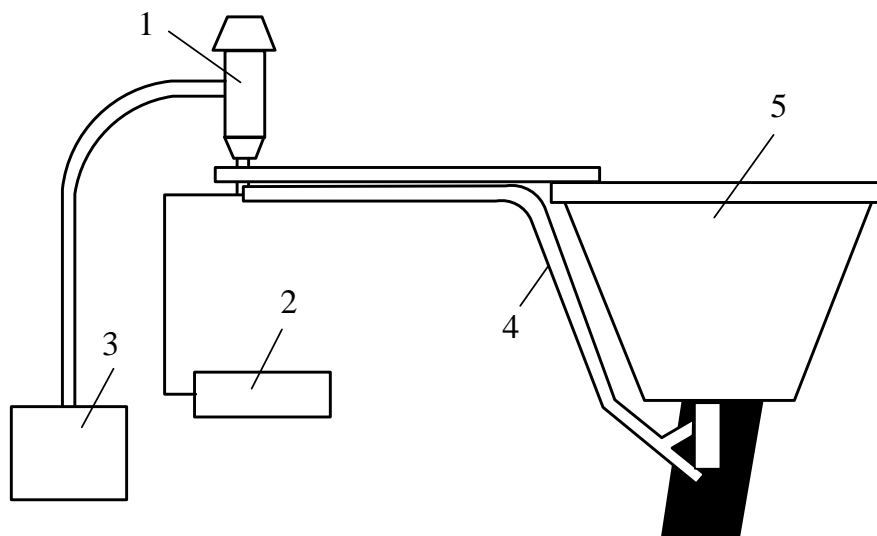


Рис. 7.17. Конструкция питателя, установленная на заводе «Hillton Works» фирмы «Stelco»: 1 – вакуумная система транспортировки; 2 – дистанционный пульт управления; 3 – большой бункер; 4 – гибкий трубопровод; 5 – промежуточный ковш

Соображения эксплуатации и безопасности требуют, чтобы в экстренных случаях питающую линию можно было легко убирать в сторону и чтобы она была достаточно гибкой для адаптации к рабочим условиям, например при замене погружного стакана. Для этого были использованы установленные в линии питающий клапан и мягкое сочленение гибкого трубопровода с постоянным трубопроводом на тележке промежуточного ковша. Если тележку промежуточного ковша необходимо срочно переместить, то такое соединение легко разъединяется.

Гибкий трубопровод соединяется с постоянным трубопроводом под площадкой промежуточного ковша. Перед тем, как опустить гибкий трубопровод для подачи смеси в кристаллизатор, включается пневматическая с использованием аргона система, необходимая для перемещения смеси на горизонтальном участке. Для распределения смеси по ширине кристаллизатора используется распределительное устройство V-образной формы.

Упаковку необходимой смеси массой 900 кг доставляют с весов на разливочную площадку. В упаковку вставляют разгрузочный вакуумный носик и примерно 23 кг смеси загружают в вакуумную систему на разливочной площадке, затем операторы контролируют расход смеси с поста управления ручьем.

Для определения эффективности питателя были выполнены традиционные измерения глубины расплавленной и нерасплавленной смеси, которые проводились в течение 20 мин периода каждую минуту как

при ручной, так и при пневматической подаче.

Если колебания глубины расплавленной смеси практически были одинаковыми в обоих случаях, то колебания толщины нерасплавившейся смеси при пневматической подаче были значительно меньшими, т.е. подача стала более равномерной.

После введения в строй указанных питателей автоматическая подача шлакообразующей смеси в настоящее время используется во всех случаях отливки слябов. Не было обнаружено никаких отрицательных факторов, влияющих на качество продукции, которые были бы связаны с введением в строй этого питателя.

Когда фирма «Corus Group», которая раньше называлась «British Steel», построила новую шестиручьевую блюмовую установку непрерывной разливки на своем заводе в Сканторпе, фирма «Clyde» спроектировала и поставила для нее пневматическую систему для транспортировки плотной фазы с целью автоматической непрерывной подачи насыпного флюса прямо в шесть кристаллизаторов (рис. 7.18).

Подобная система была впервые испытана на одноручьевой установке непрерывной разливки стали на квадратные заготовки, работающей на заводе в Стоксбридже, а затем на одном из четырех ручьев существующей блюмовой установки непрерывной разливки в Сканторпе.

Мешки массой 1 и/или 25 кг разгружают в питающий бункер, установленный над подающим сосудом с флюсом. С датчиков уровня флюса в диспергирующих сосудах поступают сигналы, при этом подается команда на подачу флюса, и с помощью устройства для медленной подачи флюсов в распределительные трубки флюс поступает в питающие диспергирующие сосуды. Подающая трубка наполнена постоянно, и подача осуществляется равномерно с очень низкой скоростью, при этом частицы флюса повреждаются минимально.

Система медленной подачи с наполненной трубкой обеспечивает плавное движение флюсов по трубкам диаметром 25 мм из диспергирующих сосудов в кристаллизаторы.

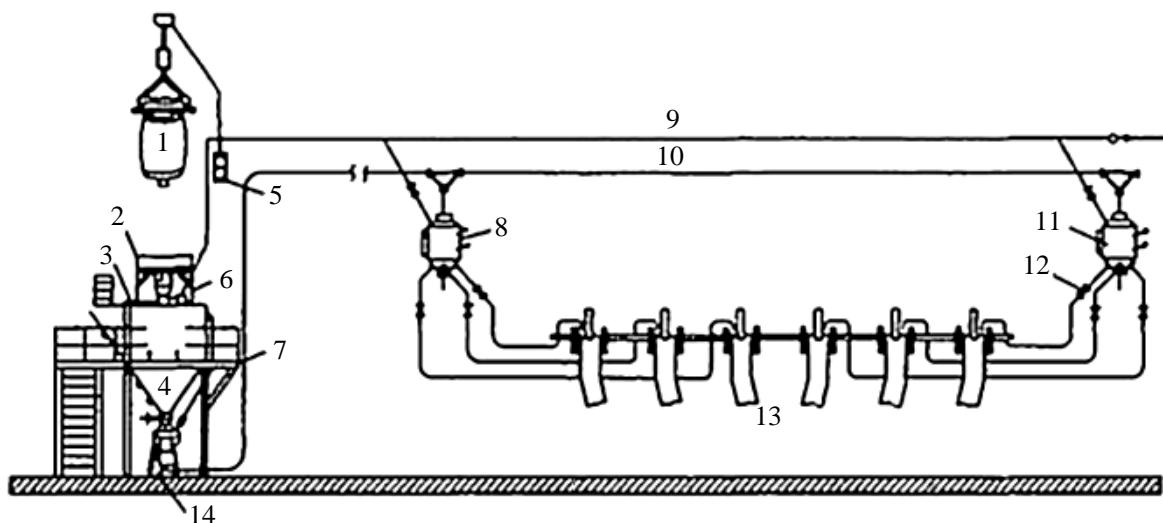


Рис. 7.18. Система для подачи плотной фазы (флюсов) в кристаллизатор на заводе в Сканторпе: 1 – большой мешок; 2 – устройство для выгрузки флюса из мешка; 3 – место для наполнения бункера из небольших мешков; 4 – питающий бункер; 5 – подвесной пульт управления; 6 – стопорный клапан; 7 – площадка для доступа к оборудованию; 8 – первый сосуд для диспергирования флюса; 9 – линия понижения давления и продувки; 10 – подача флюса в диспергаторы; 11 – второй сосуд для диспергирования флюса; 12 – клапаны для выбора ручьев; 13 – шестиручье-вая блюмовая установка непрерывной разливки; 14 – питающий сосуд с флюсом

Уровень флюса в кристаллизаторе регулируется автоматически и независимо за счет сохранения контакта с ним конца трубки (рис. 7.19). По мере расхода шлаковой смеси уровень её поверхности понижается, и возникает зазор между уровнем и концом трубки для её подачи. Когда это происходит, в системе автоматически начинается подача смеси и продолжается до тех пор, пока снова не возникнет её контакт с концом подающей трубки, при этом подача автоматически прекращается.

Алюминиевую подающую трубку легко заменить, когда это требуется.

Расстояние транспортировки от бункера для хранения флюсов до системы диспергирования составляет 48 м. Максимальная скорость подачи флюсов в каждый кристаллизатор 133 кг/ч.

Система подачи флюса в кристаллизатор успешно работает в Сканторпе. Она хорошо себя зарекомендовала при работе на промышленной установке непрерывной разливки и обеспечивает следующие преимущества по сравнению с обычными механическими системами, системами для подачи самотеком и ручными системами:

- автоматическая подача флюса (с саморегулированием) прямо в кристаллизатор, причем подача осуществляется по трубкам с малым диаметром, которые можно расположить удобным образом даже под

площадкой (как на заводе в Сканторпе);

- стабильные условия на уровне мениска, при этом обеспечиваются лучший температурный профиль, пониженный захват флюса потоком стали, повышенное качество поверхности отливок;

- меньшее пребывание оператора в потенциально опасной среде на участке разливки;

- бункер для хранения флюсов можно расположить в любом удобном месте, удаленном от участка разливки, благодаря чему уменьшается количество оборудования на участке кристаллизатора и достигается экономия времени и средств на транспортировку флюса;

- флюс можно поставлять в больших мешках, а не в маленьких, экономя расходы на упаковку и транспортировку и уменьшая потери флюса;

- уменьшается потребность в рабочей силе на установке непрерывной разливки;

- уменьшается расход флюса;

- уменьшается количество пыли, при этом улучшается рабочая среда на участке разливки;

- обеспечивается большая гибкость при размещении оборудования, причем из одного места можно обеспечить подачу флюсов в несколько ручьев.

Устройство для транспортировки заготовок.

После газорезки сляб или сортовая заготовка продолжают движение по рольгангу к передаточной тележке (для слябовых и сортовых МНЛЗ криволинейного, радиального и вертикального типов с изгибом). При помощи тележки сляб передается на рольганг для транспортировки на адьюстаж. Транспортировка слябов к прокатным цехам осуществляется при помощи подвижного железнодорожного или автомобильного транспорта. На вертикальных МНЛЗ слябовые или сортовые заготовки после газорезки подают к рольгангу при помощи специальной корзины или механизма подъема.

Совмещение непрерывной разливки стали с прокаткой позволяет избежать использования транспортировочных средств как для слябовых, так и для сортовых заготовок, использовать физическое тепло сляба, сортовой заготовки, резко снижает расход газа, электроэнергии и т.д.

7.9. Разделение непрерывного слитка на мерные заготовки

Для резки слитков на мерные длины в процессе движения применяют два типа машин – передвижные машины газовой резки и ножни-

цы. Наиболее широко используют машины газовой резки, обладающие относительной простотой конструкции, малой металлоемкостью и возможностью быстрой замены вышедших из строя узлов. Однако их крупными недостатками являются значительные потери металла в шлам при резке (1 – 2 %) и большой расход ацетилена и кислорода. Уступая машинам газовой резки по ряду показателей (масса, стоимость изготовления, ремонтные затраты и т.д.), ножницы обладают крупным преимуществом, заключающимся в безотходной резке металла. На МНЛЗ применяют два типа ножниц – качающиеся гидравлические и передвижные импульсного (ударного) действия. Первый тип используют для резки слэбов, второй – для резки сортовых заготовок.

Конструкция передвижной машины газовой резки слэбов приведена на рис. 7.19. Резка осуществляется резаками, когда машина захватывает движущийся слиток и перемещается вместе с ним.

Машина состоит из рамы 5 с четырьмя неприводными ходовыми колесами 6, двух кареток с захватами 12 и пневматическими цилиндрами 11 для их перемещения, двух суппортов 3 с механизмами 14 для горизонтального перемещения, двух резаков 1, закрепленных в держателях 2, механизмов 4 вертикального перемещения резков и канатного механизма ускоренного возврата машины. Машина осуществляет передвижение по верху эстакады посредством канатного механизма или вместе со слитком, перемещение кареток для зажатия слитка захватами, вертикальное и горизонтальное перемещение резаков для врезания и резки слитка, а также регулировки положения резаков. Передвижение машины под слитком происходит по рельсам 10, расположенным на эстакаде.

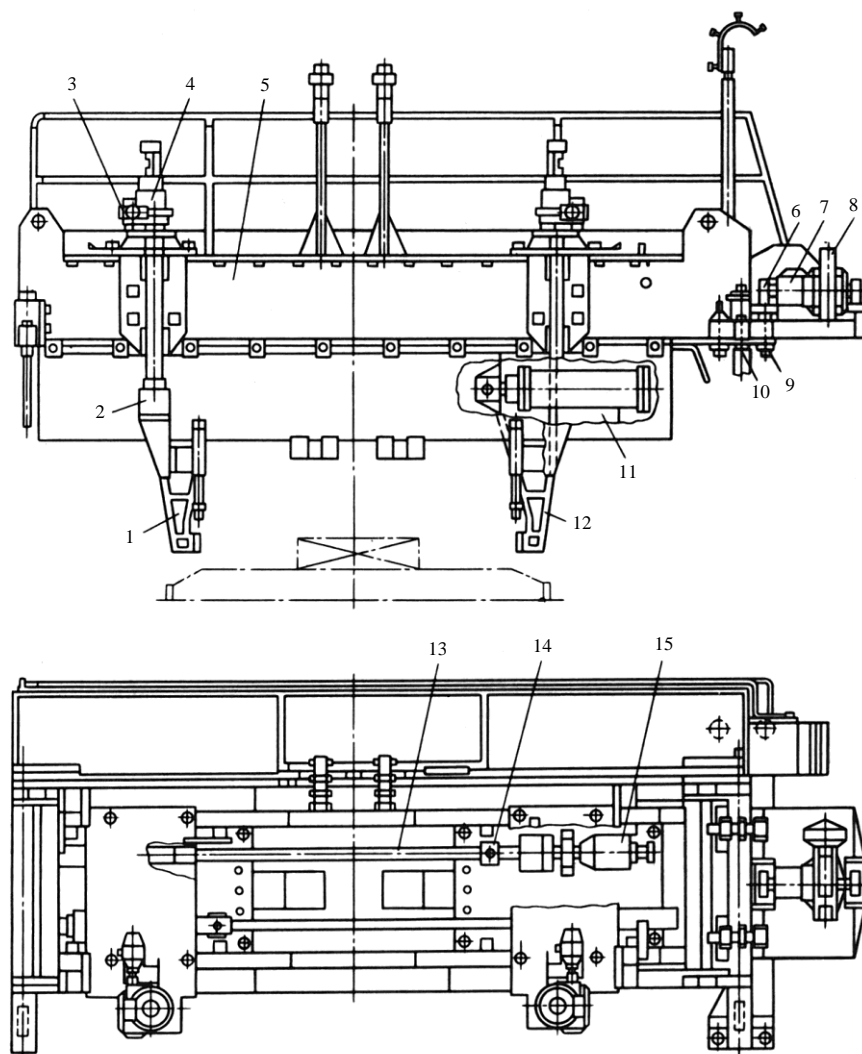


Рис. 7.19. Машина газовой резки слэба

Ходовые колеса выполнены безребордными. Горизонтальные смещения машины предупреждают две пары упорных роликов 9. Механизм ускоренного передвижения машины при нерабочем ходе устроен следующим образом. На эстакаде расположены канатная лебедка и подпружинный направляющий блок, а на раме машины – канатный барабан 7 с тормозом 8. Канат обоими концами закреплен на барабане лебедки, охватывает одной ветвью тормозной барабан на машине и огибает направляющий блок. В случае быстрого передвижения машины барабан не препятствует движению машины вместе со слитком.

Каретки с захватами помещены в направляющие рамы машины и связаны со штоками пневматических цилиндров. Последние обеспечивают перемещение кареток и зажатие слитка захватами. Горизонтальные перемещения суппортов с резаками осуществляются винтовыми механизмами с поступательно движущимися гайками, вмонтированными

ми в суппорты. Приводы и винтовые механизмы установлены на каретках. Ходовые винты 13 вращаются непосредственно от электродвигателей 15 постоянного тока с широким диапазоном регулирования частоты вращения. Вертикальные перемещения резаков создаются отдельными механизмами, расположенными на суппортах. Каждый механизм состоит из электродвигателя и червячно-винтового редуктора. Крайние положения резаков контролируются командоаппаратами. Подвод ацетилена, кислорода и воды осуществляется шлангами. Для защиты машин от теплового излучения слитка снизу установлены водоохлаждаемые экраны.

Перед началом цикла резки машина находится в исходном положении: барабан на машине заторможен, резаки разведены в крайние положения. Затем система, задающая длину отрезаемой части слитка, дает команду на последовательную работу механизма. Подачей напряжения на электромагнит растормаживается канатный барабан на машине, подается воздух в пневмоцилиндры, которые перемещают каретки и захватами зажимают слиток, в результате чего машина начинает передвигаться вместе со слитком. Дается команда на работу механизмов вертикального перемещения резаков, которые, опускаясь в нижнее положение, прогревают боковые грани слитка. Включается механизм горизонтального перемещения, резаки, двигаясь навстречу друг другу, режут слиток с обеих сторон. Когда расстояние между резаками достигнет величины около 0,10 м, один из резаков останавливается и возвращается в свое первоначальное положение, а второй дорезает слиток. После этого второй резак возвращается в исходное положение. Изменяется направление подачи сжатого воздуха в пневмоцилиндры и под их воздействием каретки с захватами расходятся, освобождая машину от слитка. Канатный барабан на машине затормаживается и включается электродвигатель лебедки возврата машины в исходное положение.

Кинематическая схема качающихся гидравлических ножниц усилием 300 кН приведена на рисунке 7.20. Ножницы относятся к закрытому типу с параллельным ходом ножей и нижним резом, исключаящим передачу усилия резания на ролики рольганга. Ножницы состоят из качающейся станины 10, установленной в опорах 11, нижнего подвижного суппорта 9, охватывающего своими направляющими стойки 6 станины, двух гидроцилиндров 12 режущего механизма, двух гидроцилиндров 3 обратного хода суппорта, гидроцилиндра 7 механизма качания станины, связанного с ней шатуном 8, и двух гидроцилиндров прижима 1, соединенных с лапами 2. Режущий механизм снабжен двумя ножами 5, из которых один закреплен в суппорте, а второй – в верхней траверсе станины.

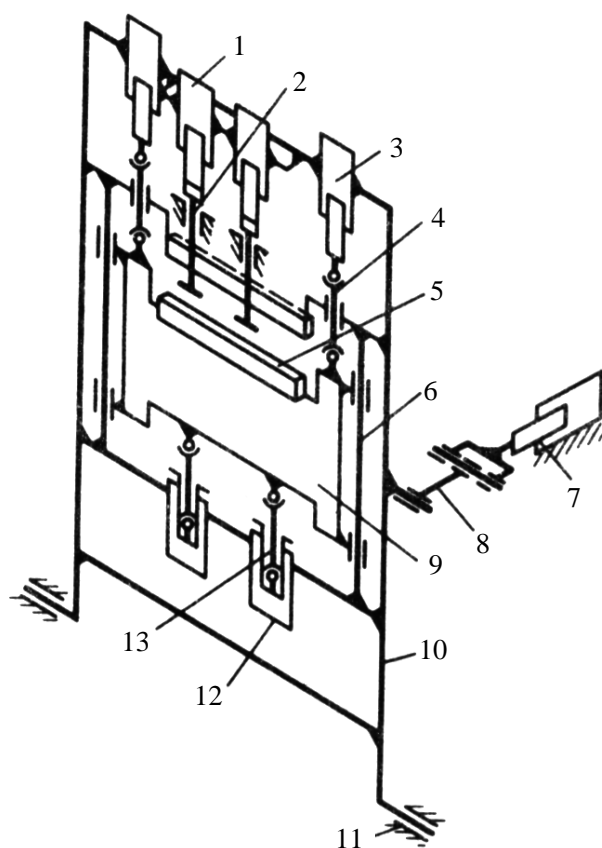


Рис. 7.20. Кинематическая схема качающихся ножниц усилием 300 кН

Все гидроцилиндры ножниц плунжерного типа, за исключением гидроцилиндра качания станины двухстороннего действия. Плунжеры гидроцилиндров 12 и 3 соединены с нижним суппортом соответственно стойками 13 и 4 со сферическими опорами.

Конструкция качающихся гидравлических ножниц показана на рис. 7.21. Станина ножниц состоит из четырех литых частей:

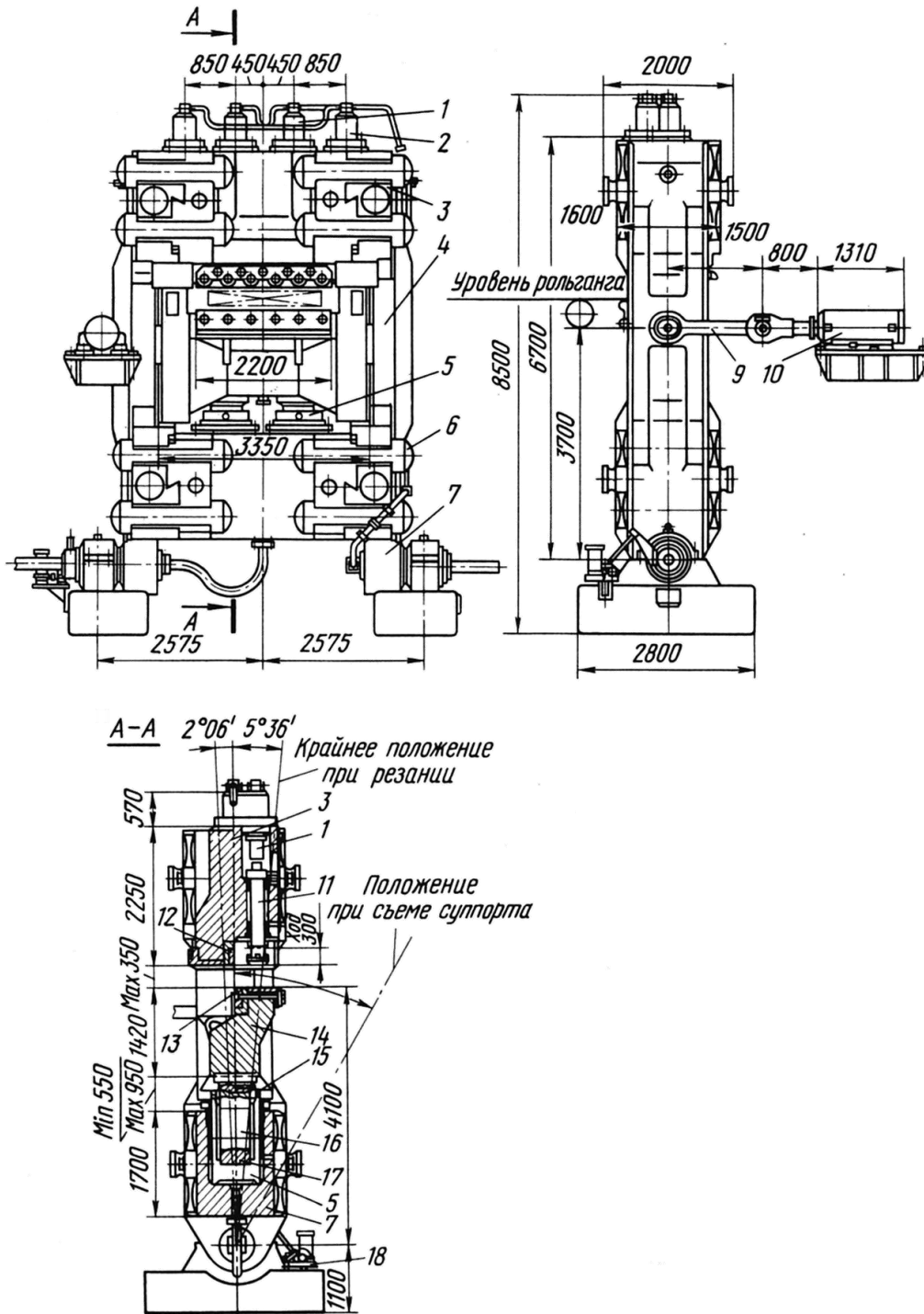


Рис. 7.21. Конструкция качающихся гидравлических ножниц усилием 300 кН двух стоек 4, нижней 7 и верхней 3 траверс. Стойки и траверсы связаны цилиндрическими анкерами 6. Нижняя траверса выполнена с гнездами под плунжеры 5 рабочих гидроцилиндров и является для них корпусом. Суппорт установлен на стойках 16, помещенных внутри плунжеров 5 и снабженных сферическими опорами 17 и 15. Такое устройство опорной

части суппорта позволило разгрузить режущий механизм от действия дополнительных нагрузок при перекосах.

Суппорт 14 вставлен в окно станины и своими направляющими охватывает ее стойки. Со стороны действия распорного усилия направляющие суппорта выполнены как одно целое с ним, с противоположной стороны – съемными. Это позволило установить и извлекать суппорт без разборки станины, что важно в условиях работы МНЛЗ. Верхняя траверса выполнена с четырьмя расточками, в которые вставлены гидроцилиндры 2 обратного хода, гидроцилиндры 1 и лапы 11 зажима. Рабочая жидкость к гидроцилиндрам, расположенным в станине, подводится через сверления в цапфах и вертлюговые соединения. Гидроцилиндр 10 механизма качания расположен в стороне от оси ножниц на отдельном основании. Для контроля углов наклона станины, управления гидроцилиндрами и блокировки с другими механизмами МНЛЗ установлен блок 18 из командоаппарата и сельсинов, связанный с цапфой станины рычажным механизмом.

Гидравлическая система снабжена двумя насосно-аккумуляторными станциями для подачи рабочей жидкости в гидроцилиндры станины и отдельно в гидроцилиндр механизма качания ножниц. В исходном положении ножницы наклонены навстречу слитку. После команды, полученной от системы резки слитка на мерные длины, в поршневую полость гидроцилиндра качания подается масло, и ножницы начинают поворот в направлении и со скоростью движения слитка, рабочая жидкость поступает в рабочие гидроцилиндры. Суппорт, перемещаясь вверх, приподнимает слиток над рольгангом, прижимает его к верхнему ножу лапами прижима и затем производит рез. Гидроцилиндры прижима находятся под постоянным давлением жидкости и в процессе резания предупреждают перекося слитка. После резки слитка давление в рабочих гидроцилиндрах снимается и под давлением гидроцилиндров обратного хода суппорт опускается. Подачей масла в штоковую полость гидроцилиндра качания ножницы возвращаются в исходное положение для последующего реза.

Используя опыт эксплуатации рассмотренных ножниц на МНЛЗ, разработан проект качающихся гидравлических ножниц усилием 450 кН.

Принцип импульсной резки металла заключается в двустороннем ударе ножами под действием взрыва газового энергоносителя.

Машина импульсной резки предназначена для одновременной резки четырех заготовок на сортовых МНЛЗ (рис. 7.22).

Машина (рис. 7.22, а) состоит из станины 1, четырех режущих механизмов 3 импульсного действия, двух направляющих ребристых ро-

ликов 2, расположенных перед станиной и внутри нее, демпфирующего ролика 5 и уборочного рольганга 7 с гладкими роликами. Режущие механизмы расположены в станине в два ряда со смещением на величину расстояния между ручьями МНЛЗ; между ними установлены короткие опорные ролики 6. Направляющие ролики приводятся в движение двумя электроприводами, расположенными с обеих сторон. Каждый привод состоит из электродвигателя и планетарного редуктора. Уборочный рольганг за машиной снабжен односторонними индивидуальными приводами роликов. Гладкий демпфирующий ролик предназначен для восприятия ударов разрезаемой заготовки, для чего предусмотрена подвеска с двумя пружинными демпферами 4. Режущий механизм (рис. 7.22, б) включает в себя траверсу 9 с ножевой плитой 10, суппорт 75, энергоузел 19, четыре колонны 13 и упругую подвеску 8. Траверса и ножевая плита соединены с энергоузлом круглыми колоннами, которые одновременно являются направляющими для суппорта. Верхний 12 и нижний 14 ножи закрепляют соответственно в ножевой плите и суппорте посредством планок, обеспечивающих их быструю замену. Для предупреждения посадки ножей друг на друга предусмотрен упор 11. Режущий механизм шарнирно соединен с упругой подвеской, которая, в свою очередь, установлена в опорах на верхней раме. Этим достигается возможность перемещения режущего механизма по ходу слитка. Поршень 16 цилиндра 17 жестко связан с суппортом, снизу к цилиндру примыкает камера сгорания 18 с газоподводящими патрубками и системой зажигания газовой смеси.

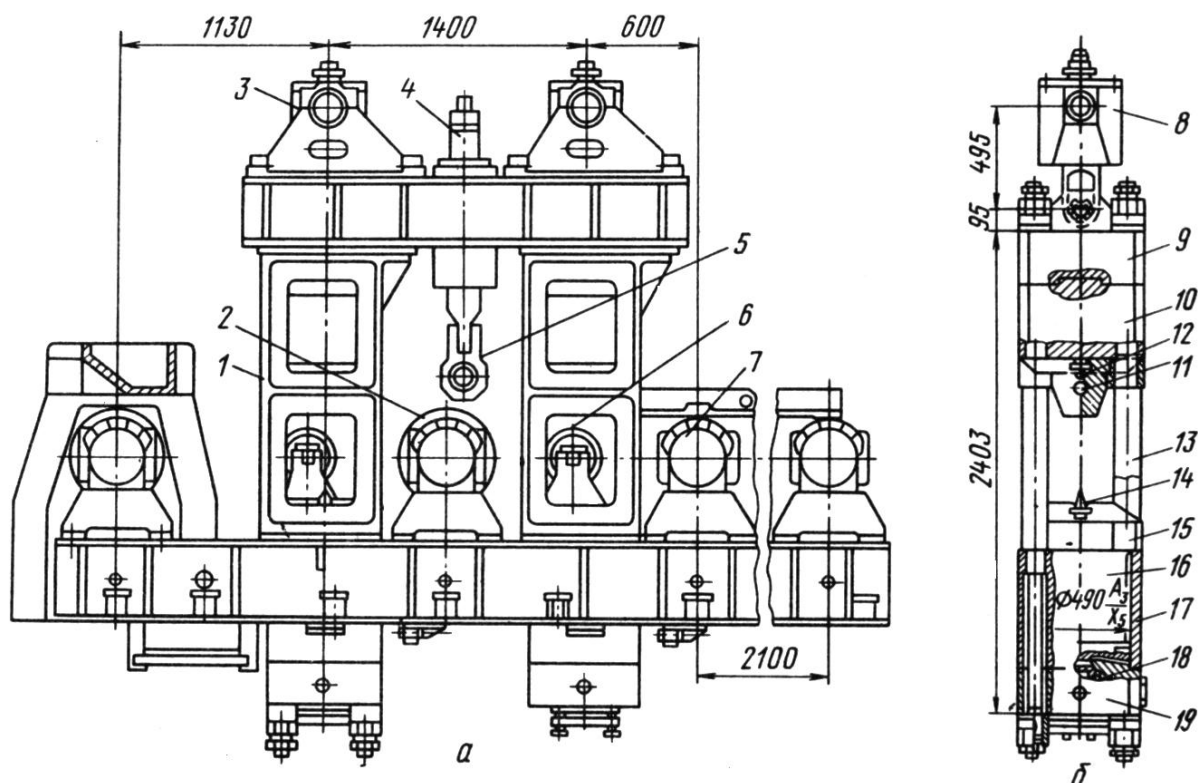


Рис. 7.22. Машина импульсной резки: а – общий вид; б – режущий механизм импульсного действия

Работает режущий механизм следующим образом. В камеру сгорания подается порция природного газа и воздуха. При быстром сгорании смеси образующиеся газы с большой силой толкают поршень вместе с суппортом и ножом вверх по направляющим колоннам. Одновременно с этим газы воздействуют на дно камеры сгорания и перемещают вниз энергоузел, а вместе с ним траверсу и плиту с верхним ножом. Происходит резание металла движущимися навстречу ножами. Возможность перемещения верхнего узла вниз обеспечивает упругая подвеска. При достижении поршнем крайнего верхнего положения продукты сгорания выбрасываются наружу и под действием силы собственного веса поршень с суппортом опускается вниз; режущий механизм занимает свое первоначальное положение. Время резания очень мало и составляет 0,01 с. Преимуществами машины импульсной резки слитков являются безотходная резка металла, удобство компоновки машины для одновременного резания нескольких слитков, применение недорогого энергоносителя. Недостатки – высокий уровень шума даже при установке глушителей и загазованность, что присуще и машинам газовой резки.

7.10. Затравки и механизмы их транспортировки

Затравка предназначена для образования временного дна в кристаллизаторе при его заполнении металлом на рабочую высоту и последующего протягивания слитка по неприводной и приводной роликовым проводкам на начальной стадии разливки.

На радиальных МНЛЗ применяют два типа заготовок – жесткие дугообразные и гибкие (цепные). Первый тип затравки представляет собой дугообразный брус, по форме сечения одинаковый с отливаемой заготовкой и изогнутый по дуге окружности с радиусом кривизны технологической оси машины. Ввод жесткой затравки в кристаллизатор производят снизу через роликовые проводки. Такие затравки используют на сортовых МНЛЗ. Затравки цепного типа применяют в радиальных и криволинейных слябовых МНЛЗ. В зависимости от податливости звеньев цепные затравки могут быть с жесткими и раздвижными звеньями. Применяют затравки с жесткими звеньями в МНЛЗ с гидравлическими механизмами перемещения и прижатия роликов. Использование затравок с раздвижными звеньями обычно является вынужденным, в случае установки на МНЛЗ приводной проводки с пружинным прижатием роликов к слитку.

На рис. 7.23 показана затравка с раздвижными звеньями. Звенья 3 шарнирно связаны между собой осями 4. Для быстрой замены головки 1 ее соединение с крайним звеном выполнено двумя короткими осями 2 на ригельных планках. Вдоль всей затравки расположены четыре резиноканевых рукава 10, помещенных между неподвижными 5 и подвижными 9 пластинами звеньев. Перемещение подвижных пластин ограничивается болтами 7. Подачу воздуха в рукава (надувку затравки) осуществляют через коллекторы 5, снабженные запорными клапанами. Для захвата затравки крюками в хвостовой части предусмотрена проушина 6.

Затравки с жесткими звеньями отличаются простотой конструкции и надежностью в работе. Недостатками затравок являются: быстрый выход из строя резиноканевых рукавов и потеря ими герметичности, недостаточное усилие прижатия звеньев к роликам, что обычно требует увеличения числа приводных роликов в проводке.

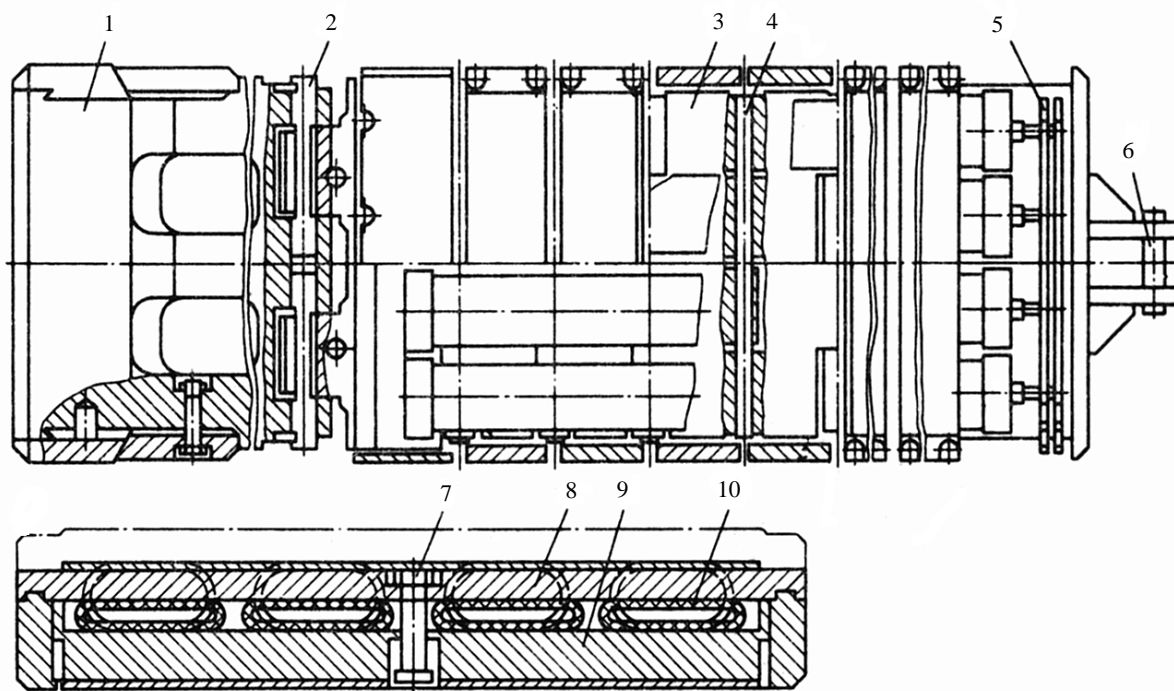


Рис. 7.23. Затравка с раздвижными звеньями

Подачу и вывод затравки в кристаллизатор, ее отсоединение от слитка и уборку после протягивания по роликовым проводкам, удержание в нерабочем положении производят специальными машинами, часто в комплексе со вспомогательными механизмами. Затравку вводят в кристаллизатор сверху или снизу, что определяется типом машин.

На рис. 7.24 показана машина для ввода затравки в кристаллизатор сверху со вспомогательными механизмами.

В комплекс оборудования, обеспечивающего циклическое перемещение затравки, входят машина 9 для подачи и ввода затравки в кристаллизатор, качающийся рольганг 1 и механизм 75 для отсоединения затравки от слитка. Машина выполняет следующие операции: принимает на свой рольганг затравку, транспортирует ее к МНЛЗ и подает в кристаллизатор. Качающийся рольганг предназначен для приема затравки, выходящей из роликовой проводки МНЛЗ, ее удержания в нерабочем положении и передачи на машину. Эти операции осуществляются соответственно при верхнем, горизонтальном и нижнем положениях качающегося рольганга. Гидравлический механизм, служащий для отсоединения затравки от слитка, выполняет эту операцию в процессе движения слитка.

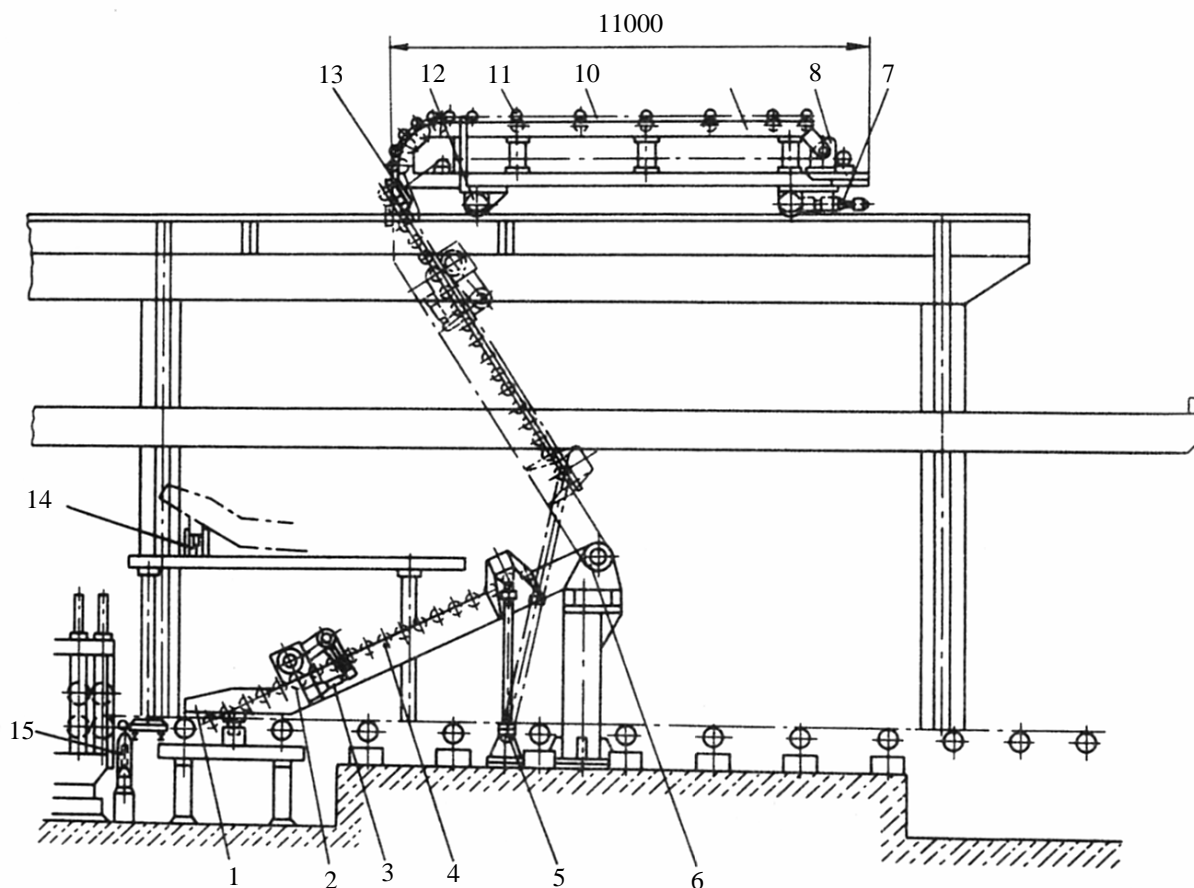


Рис. 7.24. Машина для ввода заправки в кристаллизатор сверху со вспомогательным качающимся роликом

Машина представляет собой тележку, снабженную механизмом передвижения 7, неприводным рольгангом 11 и цепным механизмом 8 перемещения заправки 13. Машина передвигается по рельсовому пути на рабочей площадке. Механизм передвижения состоит из электродвигателя, тормоза и коническо-цилиндрического редуктора, соединенного с приводным скатом 12. Рольганг машины выполнен с двумя параллельными рядами коротких роликов, расположенных на прямолинейном и дугообразном участках рамы. Ряды роликов образуют между собой зазор, в который помещена верхняя ветвь замкнутой пластинчатой цепи 10, снабженной захватом. Приводная звездочка получает вращение от электродвигателя через комбинированный редуктор. Цепь при движении захватывает хвостовую часть заправки и выдает ее на рольганг машины. Качающийся рольганг состоит из рамы с двумя параллельными рядами роликов 4, задающих роликов 2 с рычажно-пневматическим механизмом 3 прижима верхнего ролика опоры 6 и двух качающихся гидрочиллиндров 5 механизма наклона. При подаче на качающийся рольганг

затравка зажимается рычажно-пневматическим механизмом между верхним приводным и нижним неприводным задающими роликами. Приводной ролик получает вращение от электродвигателя через планетарный редуктор. В горизонтальном положении качающийся рольганг удерживается пневматическим стопорным механизмом 14. Механизм отсоединения затравки от слитка состоит из одноплечевого рычага с роликом, поворачиваемого гидроцилиндром. Недостатком рассмотренной машины является операция подъема затравки, которая выполняется сложным и металлоемким качающимся рольгангом. Этот недостаток устранен в машине последнего образца.

Машина (рис. 7.25) состоит из тележки 4 с четырьмя ходовыми колесами и механизмом передвижения, наклоняющейся стрелы 6, механизма наклона стрелы с качающимся гидроцилиндром 3, канатного механизма 7 подъема затравки и маслонапорной установки 1. Машина передвигается по рельсовому пути на рабочей площадке. С нижнего горизонта МНЛЗ затравка поднимается тележкой, передвигающейся в вертикальных направляющих. Механизм наклона стрелы обеспечивает точное центрирование затравки по оси кристаллизатора.

В состав механизма подъема затравки входят: барабанная лебедка 2, канат и система блоков-направляющих 5 и 10, уравнильного 11 и подвижных 9 блоков. К последним подвешен захват 8 для затравки. Достоинство машин с верхним вводом затравки состоит в том, что операция ввода затравки в кристаллизатор может быть начата сразу после частичного протягивания слитка по приводной роликовой проводке. Однако сокращение времени существенно только при разливке металла одной плавки. Недостаток способа ввода затравки сверху – необходимость применения самоходных машин на рабочей площадке. В случае разливки стали «плавка на плавку», когда пауза между циклами разливки достигает 180 мин, более оправданно применение стационарных машин с вводом затравки в кристаллизатор снизу, отличающихся простой конструкции и меньшей металлоемкостью. На рис. 7.26 приведена машина для ввода затравки снизу стационарного типа.

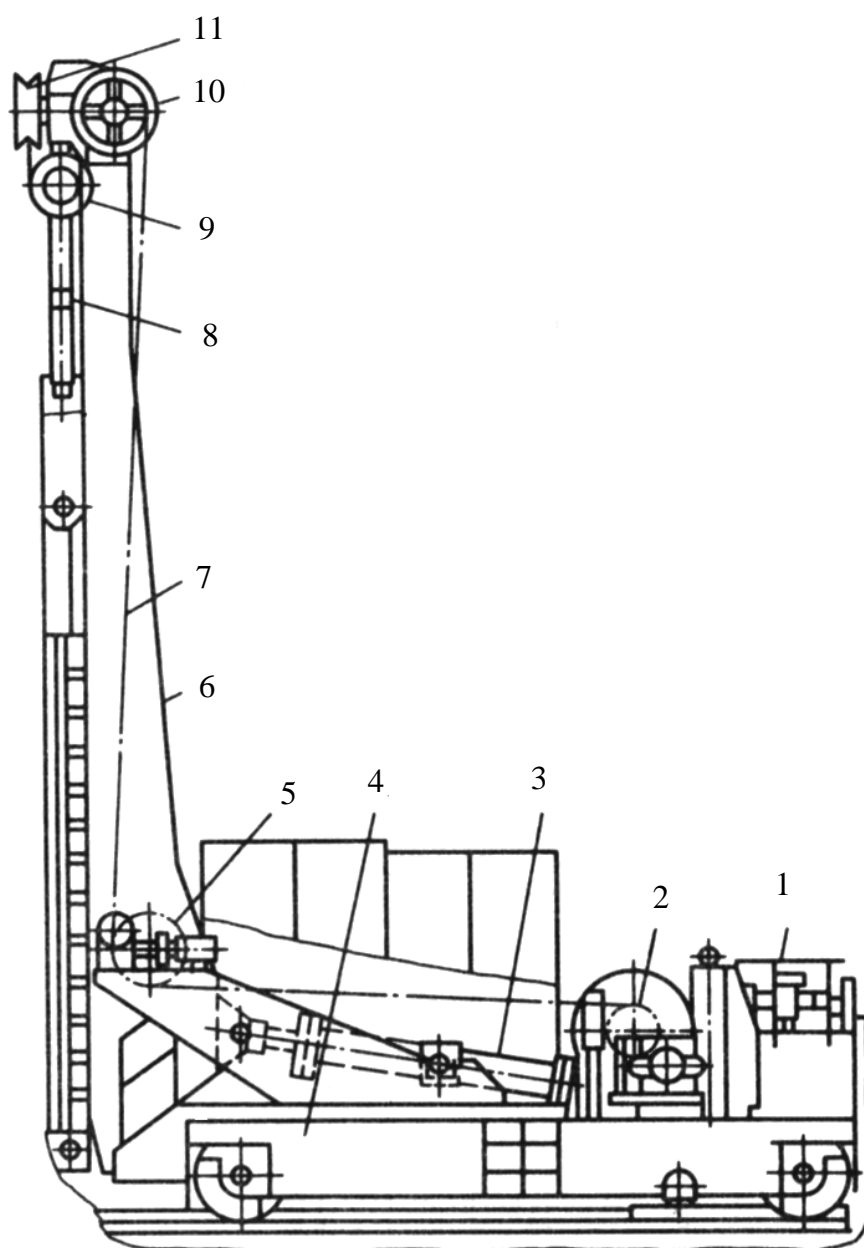


Рис. 7.25. Машина для ввода затравки в кристаллизатор сверху

Машина состоит из качающегося стола 2 с неприводным рольгангом, механизма наклона стола с двумя качающимися гидроцилиндрами 1, каретки 5, снабженной ходовыми роликами и двумя крюками, направляющей 4 для каретки, канатного полиспаста 7 и барабанной лебедки 6. Для направления затравки при переводе из горизонтального положения в вертикальное предусмотрены ролики 3 – один стационарный, а второй закрепленный на столе.

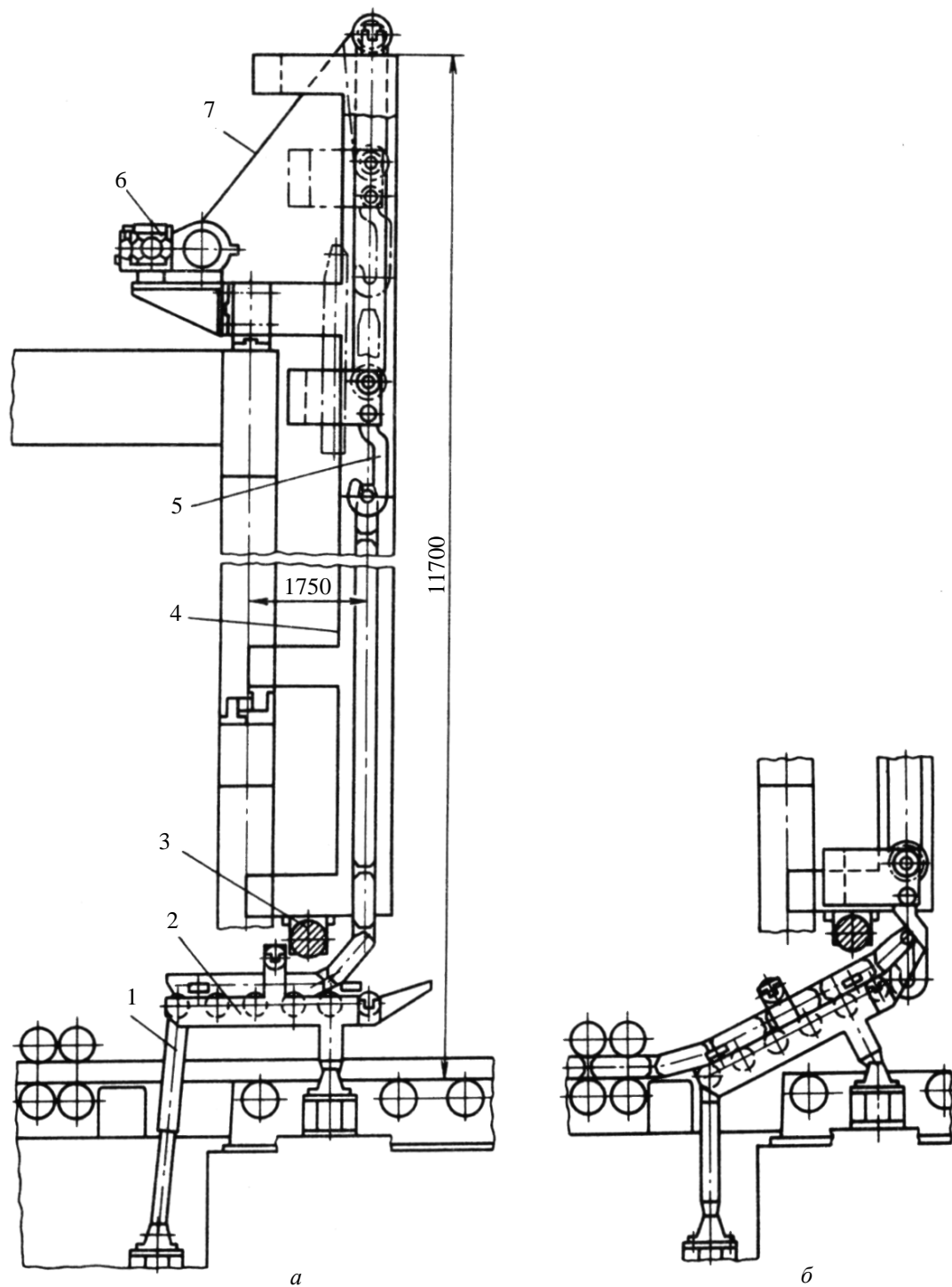


Рис. 7.26. Стационарная машина для ввода затравки в кристаллизатор снизу

На рис. 7.26, а показана затравка в поднятом нерабочем положении, а на рис. 7.26, б – в момент разъединения с крюками каретки. Затравку вводят в кристаллизатор через горизонтальный и радиальный участки роликовой проводки изменением направления вращения роли-

ков. При подаче затравки в роликовую проводку, как и при ее приеме, стол занимает наклонное положение. Отсоединение головки затравки от слитка при выходе ее из роликовой проводки производят перемещением стола снизу вверх. Преимуществами стационарной машины перед другими типами являются ее вертикальное положение, позволившее сократить длину участка МНЛЗ от последней роликовой секции до газорезки; устранение путей на рабочей площадке и у кристаллизатора, что позволило улучшить условия проведения ремонтов и обслуживания оборудования.

Глава 8 Усовершенствование конструкций поддерживающих систем в зоне вторичного охлаждения заготовки, обжатие заготовки с неполностью затвердевшей сердцевиной

Зона вторичного охлаждения, в которую поступает заготовка в виде затвердевшей корочки, заполненной жидким металлом, наряду с кристаллизатором играет также важнейшую роль в получении бездефектной заготовки. От жесткости роликовой системы и точности ее настройки, конструкции роликов, их количества, интенсивности охлаждения в зависимости от химического состава стали и параметров разлива в значительной степени изменяются пораженность металла продольными и поперечными трещинами, пористость осевой зоны и сегрегация углерода.

В связи с этим для совершенствования системы вторичного охлаждения и разработки новых приемов воздействия на заготовку в этой зоне проведено много исследований, результатом которых явились совершенно новые конструкции этих систем, создание на этой основе новых более совершенных МНЛЗ и реконструкция действующих.

Наиболее существенным достижением является создание моделей и конструкторских систем обжатия заготовок с не полностью затвердевшей сердцевиной, или так называемого мягкого обжатия на последних стадиях затвердевания заготовки с целью компенсации усадки, а при отливке слябов и для уменьшения толщины заготовки.

Пионерами в этой области выступили японские и австрийские металлурги.

Большое внимание изучению процессов, происходящих в металле при обжатии заготовки с не полностью затвердевшей сердцевиной, в том числе и на фундаментальном уровне с изучением характера деформирования на границе твердой и жидкой фаз, было уделено фирмой «Sumitomo Metal» (Япония). При изучении этих вопросов на установке, позволяющей обжимать 2-т слиток толщиной 230 и шириной 800 мм в разных режимах и при разных температурах, было установлено, что коэффициент проникновения обжатия уменьшается с уменьшением доли жидкой сердцевины и зависит от температуры поверхности заготовки. На той же фирме на лабораторной установке провели эксперименты с обжатием заготовки диаметром 260 мм из стали с 13 % Cr на 2 –7 мм, начиная от доли твердой фазы в осевой зоне порядка 0,1 до полного затвердевания. Результаты изучения макроструктуры разрезов продольного сечения показали, что при обжатии на 2 мм по диаметру заготовки

(относительное обжатие 0,8 %) осевая пористость практически исчезает, а при обжатии на более 4 мм происходят чрезмерное деформирование и выдавливание остаточного ликвата за пределы зоны обжатия. При обжатии на 2 мм полукруглыми бойками поперечное сечение уменьшается практически на величину усадки при кристаллизации.

На опытной установке этой фирмы с разливкой 50-т плавков в слябы 70 – 100×1000 мм при скорости 3,5 – 5 м/мин низко- и среднеуглеродистых сталей установили, что режим обжатия заготовки на 30 мм в трех парах роликов в последовательности 15 – 10 – 5 мм обеспечивает устранение трещин в заготовках, уменьшается также осевая ликвация.

Мягкое обжатие не полностью затвердевшей заготовки постепенным уменьшением раствора валков в зоне вторичного охлаждения, согласованным с усадкой слитка, позволило увеличить скорость разливки электротехнической стали с содержанием более 3 % Si на слябы толщиной 250 мм на заводе фирмы «Nippon Steel» в Явате на криволинейной машине. Все предыдущие меры (увеличение интенсивности охлаждения в зоне спрейерного охлаждения, водяное охлаждение кромок, подпрессовка в зоне выпрямления слитка, понижение температуры разливки и электромагнитное перемешивание) дали определенные результаты, но окончательное решение проблемы оказалось возможным только после завершения всех предыдущих мер мягким обжатием.

Той же фирмой были проведены эксперименты по изучению ликвации в условиях обжатия слитка, необходимых для компенсации усадки при затвердевании. Эксперименты проведены с использованием конической изложницы со сталью с 0,12 % C, в которой в конце затвердевания стали (при образовании 50 % твердой фазы) на прессе с плоскими бойками деформировали слиток на 10 мм со скоростью 1 мм/мин. При изучении образцов, отобранных от слитка и захватывающих осевую зону, установлено, что в зоне обжатия обнаруживаются лишь незначительные колебания содержания марганца с малой амплитудой, тогда как до начала обжатия в осевой зоне сильно, с большим периодом, изменяется концентрация марганца. При легком обжатии измельчалась первичная структура, в результате промывающего потока жидкой стали при обжатии устраняется накопление ликватов в зоне кристаллизации.

Исследование трещинообразования при обжатии заготовки с не полностью затвердевшей сердцевиной проведено фирмой «Kawasaki Steel» (Япония) на установке с сечением кристаллизатора 110×400 мм с обжатием 13 парами роликов в двух зонах длиной 655 и 1400 мм на величину 2 – 19 мм при скорости разливки 0,9 – 1,6 м/мин. Заготовка обжималась на определенную величину, замораживалась, и по серному отпечатку разреза заготовки определяли позицию образования внутрен-

них трещин. Критической деформацией считалась деформация, при которой образовывались трещины. Между этой величиной и разницей температур ликвидуса и солидуса зависимость не выявлена. Полученные результаты хорошо объяснялись температурной зависимостью, связанной с наличием определенного количества твердой фазы. Диапазон образования внутренних трещин оказался в интервале от температуры снятия напряжений (доля твердой фазы 0,7) до температуры потери пластичности (доля твердой фазы 0,99). Для сталей с 0,18 % С критическая деформация составила около 0,75 %, для сталей с 0,8 % С – около 0,5 % и для нержавеющей стали SU430 – 1,8 – 2,0 %.

В ряде исследований было установлено, что мягкое обжатие крупных квадратных или прямоугольных заготовок представляет существенные трудности вследствие довольно большой разницы температур по углам и в середине заготовки и, следовательно, разницы в сопротивлении обжатию заготовки в этих зонах.

Так, на фирме «Nippon Kokan» после проведения комплекса экспериментов пришли к выводу, что мягкое обжатие не полностью затвердевшей крупной заготовки целесообразно в валках, не превышающих ширину заготовки, а, наоборот, меньше ее. Необходимость исследования была вызвана тем, что при длинных бочках валков не всегда достигается необходимая степень обжатия из-за сопротивления затвердевших углов заготовки, а при слишком коротких образуются горячие трещины на границе твердой и жидкой фаз. Практически полного устранения ликвации без образования горячих трещин добились при использовании валков с длиной бочки 250 – 300 при обжатию заготовки 400×520 мм при деформации около 0,1 %.

С аналогичными проблемами столкнулись на фирме «Nippon Steel» в Кимицу. На МНЛЗ вертикальной с изгибом, отливающей блюмы сечением 300×500 мм, после серии экспериментов с применением мягкого обжатия при различных режимах разлива отработали и внедрились оригинальную технологию мягкого обжатия заготовок из стали с содержанием 0,7 – 0,9 % С двумя парами дисковых валков, при которых обжимается только не полностью затвердевшая зона слитка (исключая затвердевшие кромки). Максимальный эффект, соответствующий уменьшению ликвационной зоны до диаметра 2 мм, получен при обжатию на 3 мм обычными валками. При обжатию на меньшую величину эффект проявляется в меньшей степени, при обжатию на большую величину результат носит обратный характер, т.е. ликвация усиливается. Была также установлена тесная связь между степенью ликвации с долей твердой фазы в осевой зоне и на этой основе разработана система контроля осевой ликвации с определением режимов термической обработ-

ки на последующих технологических операциях.

Как было показано расчетами и экспериментами на фирме «Daido Steel», наиболее эффективным мягкое обжатие оказалось при отливке крупных заготовок.

В качестве второй МНЛЗ фирма «Daido Steel» установила вертикальную машину, которая была сконструирована для получения заготовок повышенного качества широкого марочного сортамента при низких эксплуатационных затратах. Машина оборудована системой электромагнитного перемешивания (ЭМП) в кристаллизаторе и в зоне вторичного охлаждения, воздушно-туманным охлаждением подогревом металла в промежуточном ковше.

Ниже представлены экспериментальные условия опытных разливок подшипниковой стали:

Диаметр после кристаллизатора, мм	350
Скорость разливки, м/мин	0,3 – 0,5
Перегрев в промежуточном ковше, °С	40±10
Вторичное охлаждение, л воды / кг стали	0,17
Скорость ЭМП, м/с:	
в кристаллизаторе	0,3
в зоне вторичного охлаждения	0,3
Мягкое обжатие:	
расстояние роликов от мениска, м	11,3 – 15,5
количество твердой фазы	
в твердожидком состоянии, f_s	0,2 – 1,0
ΔH , мм	0 – 30
ΔF , %	0 – 3

В настоящее время большинство подшипниковых сталей из слитка производится на МНЛЗ № 2, за исключением применяемых для производства шариков.

Участок роликов мягкого обжатия состоит из двух пар приводных роликов диаметром 400 мм, которые перемещаются в позицию, обеспечивающую оптимальное давление в оптимальном положении затвердевающей заготовки. Усилие обжатия составляет 50 т/ролик.

Для определения оптимальных технологических параметров для подшипниковой стали (скорости разливки и величины мягкого обжатия) степень мягкого обжатия в опытных разливах изменялась. Кроме того, интенсивность вторичного охлаждения поддерживалась на низком уровне для предотвращения поверхностных трещин и интенсивность ЭМП контролировалась до максимального уровня во избежание образования белой полосы (зоны отрицательной сегрегации).

Были исследованы и подсчитаны сегрегации углерода, угол V-образной сегрегации, внутренние трещины в макроструктуре и сама макроструктура литой заготовки, а также сегрегация углерода, макроструктура, внутренние трещины и остаточные карбиды в катаных заготовках.

На рис. 8.1 приведены данные о сегрегации углерода в поперечном направлении литой заготовки, сравнение которых показывает, что сегрегация углерода значительно снижена за счет применения оптимального мягкого обжатия, позволившего подавить мостообразование дендритов в осевой зоне.

На рис. 8.2 показана сегрегация углерода в центре катаной заготовки в зависимости от условий и некоторых параметров разливки металла. Видно, что сегрегация слегка улучшается при разливке на вертикальной установке, в то же время применение мягкого обжатия при оптимальных параметрах разливки, как это показано в позиции а на рисунке 5.2 ($v_c = 0,4$ м/мин, доля твердой фазы $f_s = 0,4$), улучшает макроструктуру до уровня слиточного металла (точка г на рис. 8.2). Влияние мягкого обжатия очень сильно зависит от доли твердой фазы в сердцевине, при которой прикладываются обжимающие силы. Мягкое обжатие дает небольшое (более $0,4 f_s$) увеличение доли твердой фазы и вызывает внутренние трещины менее $0,4 f_s$.

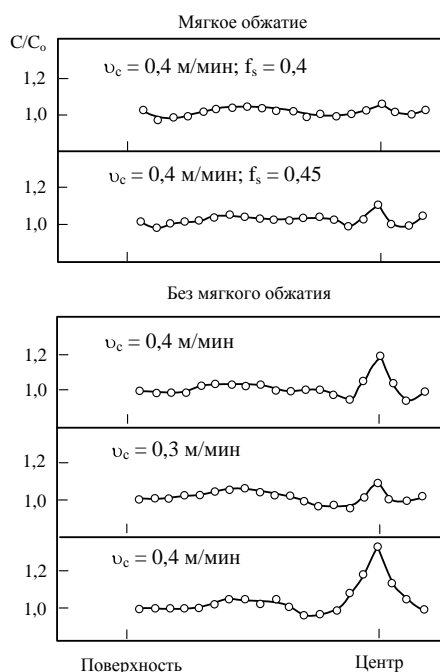


Рис. 8.1. Сегрегация углерода в центре литой заготовки с мягким обжатием и без него (сверло диаметром 4 мм) при разливке на вертикальной (светлые точки) и криволинейной (черные точки) МНЛЗ

На рис. 8.3 представлено отношение между степенью обжата, долей твердой фазы в сердцевине и появлением внутренних трещин. Низкая доля твердой фазы и высокая степень обжата ведут к появлению внутренних трещин. Кроме того, улучшение сегрегации без появления внутренних трещин ограничено внутри интервала, очерченного штриховой кривой, которая показывает, что технологические параметры должны быть строго соблюдены, чтобы быть полностью внутри этого интервала.

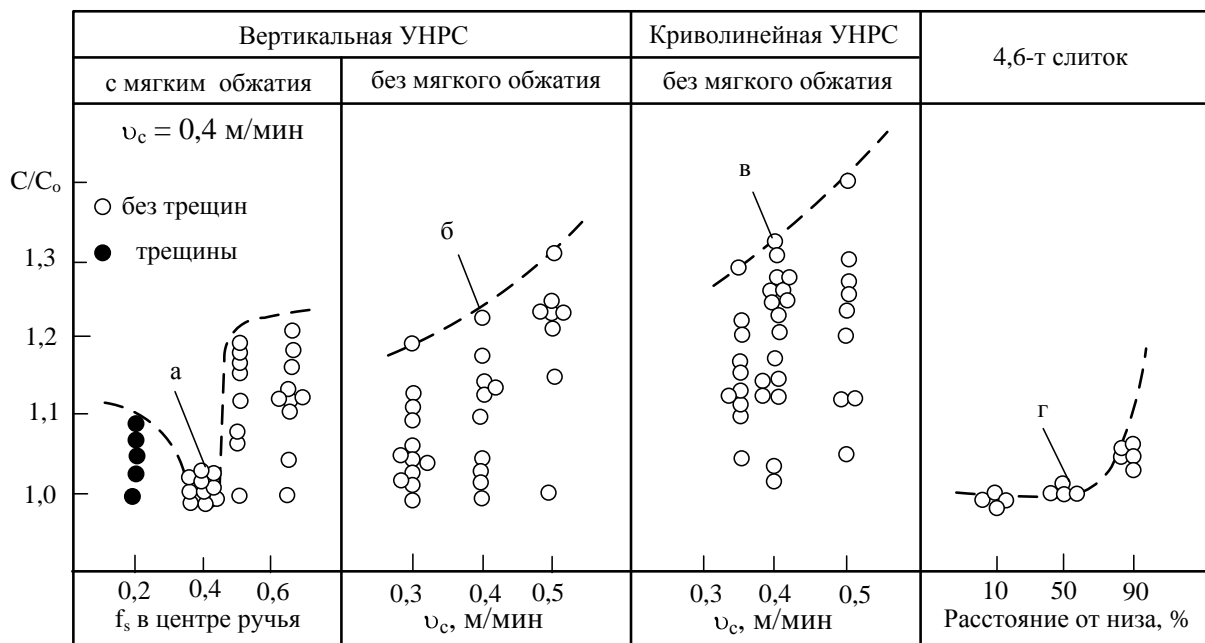


Рис. 8.2. Влияние на сегрегацию углерода в центре катаной заготовки условий разливки

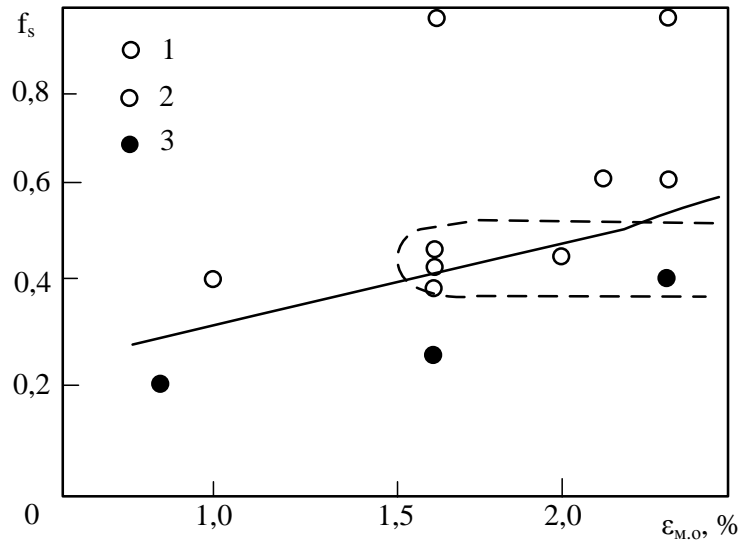


Рис. 8.3. Отношение между степенью мягкого обжатия ($\epsilon_{м.о}$), количеством твердой фазы в двухфазной зоне (f_s) и образованием трещин:
1 – без трещин, 2 – мало трещин, 3 – трещины

Оптимальными технологическими параметрами на второй МНЛЗ являются: доля твердой фазы 0,4 и степень обжатия 1,6 %, которые реализуются постоянной скоростью разливки и тщательным контролем и регулировкой зазора обжимающих роликов.

Как можно понять из рис. 8.3, трудно осуществить эффективное мягкое обжатие бруса квадратного сечения без возникновения внутренних трещин.

Количество остаточных карбидов в сердцевине катаных заготовок после гомогенизации, полученных прокаткой заготовок, отлитых на второй МНЛЗ, меньше, чем в заготовках с первой МНЛЗ.

При литье сортовых заготовок обнаружена самая низкая эффективность механического мягкого обжатия. Многообещающей альтернативой является термическое мягкое обжатие, т.е. жесткое охлаждение слитка в конце затвердевания. В связи с этим достаточно важно выявленное сильное влияние ударного давления водяной струи на теплоотвод (рис. 8.4).

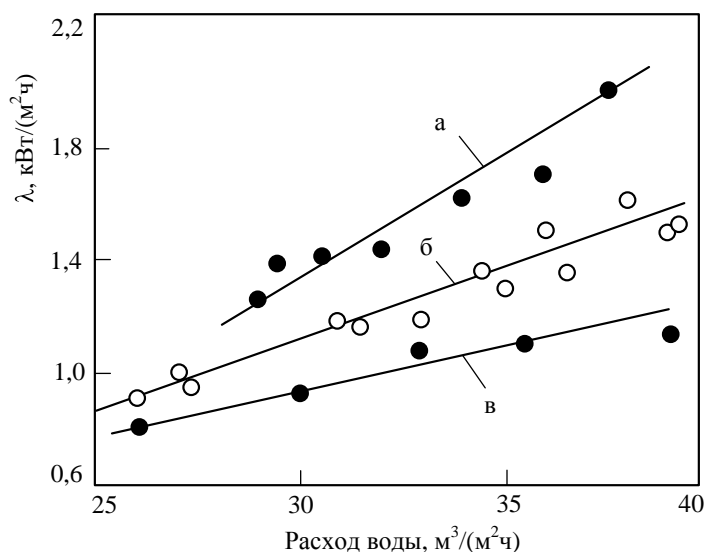


Рис. 8.4. Теплоотдача при литье заготовок сечением 120×120 мм: ударное давление водяной струи: а – высокое, б – среднее, в – слабое

В Европе наибольших достижений в совершенствовании системы вторичного охлаждения добилась фирма VAI, которой разработана система моментальной автоматической регулировки толщины.

Роликовая система SMART характеризуется следующими преимуществами:

- легкое и быстрое автоматическое регулирование зазора между роликами и толщины заготовки;

- надежная безотказная конструкция, созданная на основе стандартных компонентов (простых двухпозиционных клапанов, а не сервоклапанов);

- позволяет повысить производительность МНЛЗ в случае отливки заготовок разной толщины, поскольку дает возможность быстро изменить толщину;

- высокое качество внутренней части заготовки даже при переходных условиях разливки благодаря использованию модели DYNACS, описывающей вторичное охлаждение.

Роликовую секцию SMART можно отрегулировать за минуту в процессе переналадки установки непрерывной разливки и без такой переналадки.

Технологические пакеты, сочетающие сегменты SMART и модель вторичного охлаждения DYNACS, обеспечивают регулирование конусности зазора роликов в зависимости от точки слитка, в которой происходит окончательное затвердевание. Это выполняется системой автоматического регулирования конусности слитка (САРКС), которая перенастраивает заданные параметры сегментов SMART для поддержания оп-

тимальной конусности даже при изменении скоростей разливки.

Новая конструкция сегментов SMART имеет все преимущества предыдущих поколений. Главным достоинством является конструкция из четырех цилиндров, удобная для профилактического ухода, причем для регулирования ролика используется только один цилиндр.

Характеристики и преимущества сегмента SMART: система управления спроектирована для тяжелых условий работы, поэтому используются только прочные и гарантированные от поломки компоненты гидравлического оборудования, которые упрощают профилактическое обслуживание; метод дистанционного регулирования зазора ролика/системы вытягивания слитка является одновременно быстрым и простым; можно устанавливать параллельные, конические и частично конические профили зазора ролика; оптимизированное качество продукции достигается с помощью мягкого обжатия благодаря сочетанию сегментов SMART, систем вторичного охлаждения DYNACS и CAPCS.

После испытания роликовой секции SMART в цехе изготовления на заводе в Линце в начале 1996 г. ее применили на МНЛЗ № 5 фирмы «Voest-Alpine Stahl Linz» и надежность и точность в работе этой секции были подтверждены.

Первую МНЛЗ, полностью оснащенную системой направляющих роликов с использованием роликовой секции SMART, ввели в эксплуатацию в декабре 1997 г. на фирме «Rautaruuki» (Финляндия).

VAI получила заказ на проект системы вытягивания слитка SMART для МНЛЗ № 1 от компании «Pwa» (Италия). В данном проекте сегменты, ранее поставленные VAI для двухручьевого МНЛЗ № 1, были модернизированы до уровня SMART. Ввод в эксплуатацию состоялся в апреле 2000 г.

В 1999 г. были получены заказы от фирмы «Bethlehem Steel» на установку сегментов SMART на заводе «Sparrow's Point», «Voest-Alpine Stahl Linz» (МНЛЗ № 5) и POSCO (МНЛЗ № 2). Ввод первой МНЛЗ для разливки коррозионностойкой стали запланирован на июнь 2002 г. в компании «Outocumpu» (Финляндия).

При реконструкции существующих и строительстве новых МНЛЗ фирма VAI в полной или частичной мере использует не только описанные выше усовершенствования кристаллизатора и системы вторичного охлаждения, но и более существенные изменения в этой системе.

Фирма пришла к выводу, что прямолинейный кристаллизатор – наилучшее решение для выполнения самых жестких требований к внутренней чистоте слябов. Переход на прямолинейный кристаллизатор требует минимальных изменений существующего оборудования, краткосрочной остановки МНЛЗ и небольших капиталовложений. Приме-

ром может служить совместная разработка фирм «Usinor» и VAI, которые запатентовали конструкцию нового переходного изгиба с вертикального на имеющийся постоянный радиус ручья МНЛЗ (рис. 8.5).

В Японии все основные производители стали уже обеспечили реконструкцию своих слябовых МНЛЗ и переделали их в вертикальные с изгибом заготовок в горизонтальное положение. В Европе и США, а также в России большинство МНЛЗ радиального или криволинейного типа.

О большей эффективности работы вертикальной МНЛЗ с изгибом по сравнению с криволинейной в отношении обеспечения качества металла при высокой скорости разливки достаточно убедительно свидетельствуют результаты эксплуатации двухручьевого МНЛЗ, введенной в 1993 г. на заводе фирмы «Kawasaki Steel» в Мидзусиме. МНЛЗ имеет вертикальный участок длиной 3 м и металлургическую длину 45 м при скорости разливки 2,5 м/мин. Охлаждение водовоздушное, качание кристаллизатора гидроцилиндрами с максимальной частотой 400 цикл/мин. Все процессы от разливки до выдачи слитков автоматизированы. Благодаря 3-м вертикальному участку газовые пузыри и дефекты в виде разбухания слитка отсутствуют. Глиноземистые включения переместились во внутренние объемы слитка, их содержание невелико, его поверхность более качественна по сравнению с криволинейным слитком. В конечном итоге повысили температуру заготовки на выходе из МНЛЗ и обеспечили напрямую направление ее на прокатку.

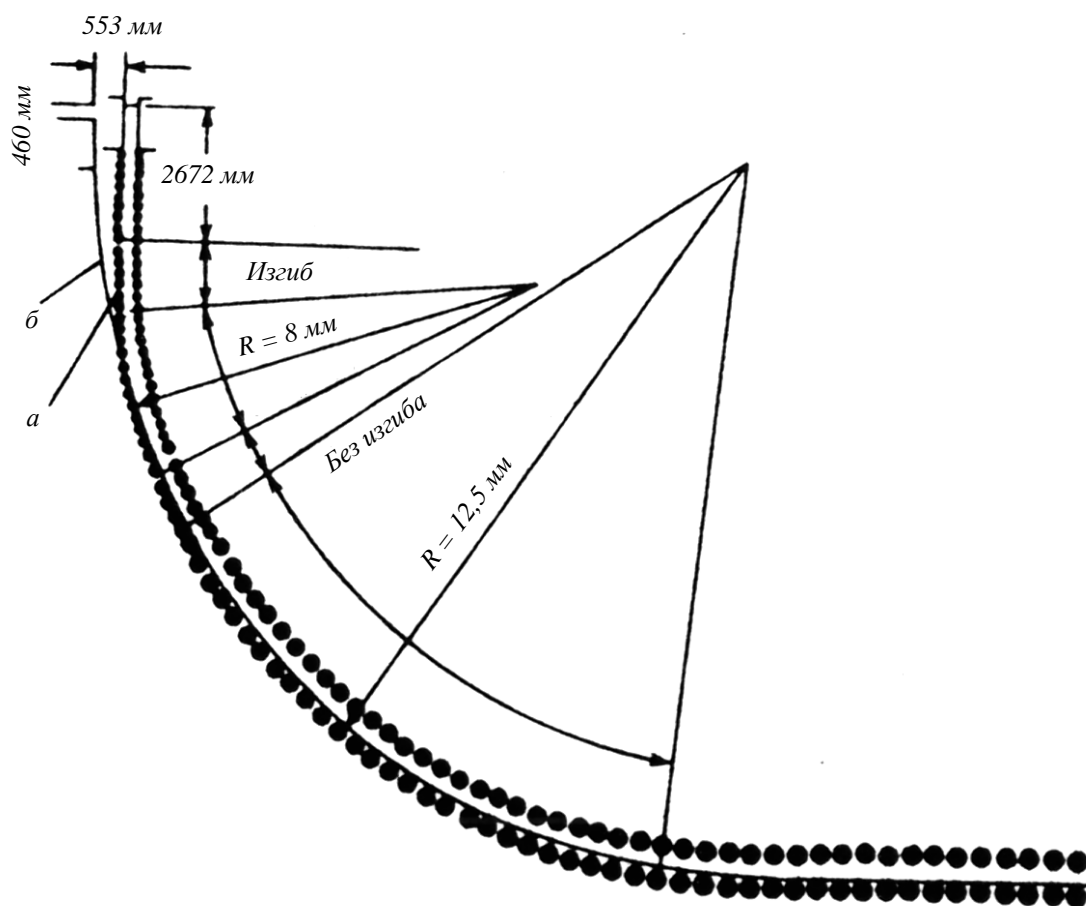


Рис. 8.5. Схема реконструкции с переходом на прямолинейный кристаллизатор (а) вместо криволинейного (б)

Вертикальная с изгибом МНЛЗ для отливки слябов размером до 230×1230 мм, специально предназначенных для производства толстого листа, введена в эксплуатацию в 1992 г. на заводе фирмы «Kobe Steel» в Какогаве. Вертикальный участок длиной в 2,95 м приняли достаточным для всплывания неметаллических включений. Общая металлургическая длина МНЛЗ 40,5 м. Была поставлена задача отливки слябов из среднеуглеродистой стали со скоростью 2 м/мин. Однако при ее решении столкнулись с очень многими трудностями, проявившимися в образовании в металле угловых, горизонтальных трещин, расслоений, ликвации и других дефектов. Только последовательным изучением причин и мест возникновения этих дефектов удалось практически полностью их устранить и обеспечить подачу заготовок в нагревательные печи прокатного стана горячим посадом в количестве до 77 %. Разработанные меры свелись в основном к мягкому охлаждению в кристаллизаторе и на пря-

молинейном участке и, напротив, жесткому охлаждению в зоне выпрямления и на последующем горизонтальном участке, установке на этом участке клетки с жесткими валками, применению специально разработанной легкоплавкой и низковязкой шлакообразующей смеси. Опыт ввода в эксплуатацию и освоения этой машины свидетельствует, что для достижения скорости разливки 2 м/мин при отливке слябов недостаточно просто сооружения МНЛЗ с продуманной конструкцией, необходима ее последовательная доводка по очень многим параметрам. Пример этот является весьма характерным.

Еще одним примером сооружения МНЛЗ нового поколения является МНЛЗ № 6 на заводе фирмы «Nippon Kokan» в Фукуяме, при создании которой преследовались три цели: повышение качества слябов, повышение производительности и снижение расходов.

МНЛЗ № 6 одноручьева, вертикальная с изгибом, с высотой вертикальной секции 3 м. Этой высоты достаточно для всплытия крупных включений, приводящих к поверхностным дефектам слябов. Длина зоны легкого обжата составляет 17 м. Сегменты легкого обжата оборудованы разрезными роликами с коротким шагом. Металлургическая длина МНЛЗ составляет 49 м при скорости разливки 3 м/мин. Месячная производительность составляет 177 тыс.т при отливке слябов сечением (220-300)×(675-2100) мм. Скорость разливки была увеличена по сравнению с используемой на ранее построенных МНЛЗ. При сооружении МНЛЗ использованы и другие новшества: горячий оборот промежуточного ковша с дистанционным управлением замены разливочного стакана с помощью роботов, разливка на МНЛЗ при разной ширине кристаллизатора.

Ширина сляба изменяется в зависимости от сортамента продукции. Это потребовало разработки оригинальной системы быстрой замены узкой стенки кристаллизатора.

Рама кристаллизатора на узкой стороне содержит подвижные и неподвижные части. Они соединяются зажимным устройством и разъемными. На рис. 5.6 показан порядок действий по изменению ширины кристаллизатора. Прежде всего, оператор удаляет крышку кристаллизатора на узкой стороне и освобождает зажимное устройство кристаллизатора. Затем удаляют прежнюю узкую стенку и с помощью тележки устанавливают новую. В заключение оператор соединяет разъем кристаллизатора и устанавливает покрытие. Продолжительность операции около 30 мин. Обычно такую операцию в течение месяца проделывают примерно 15 раз.

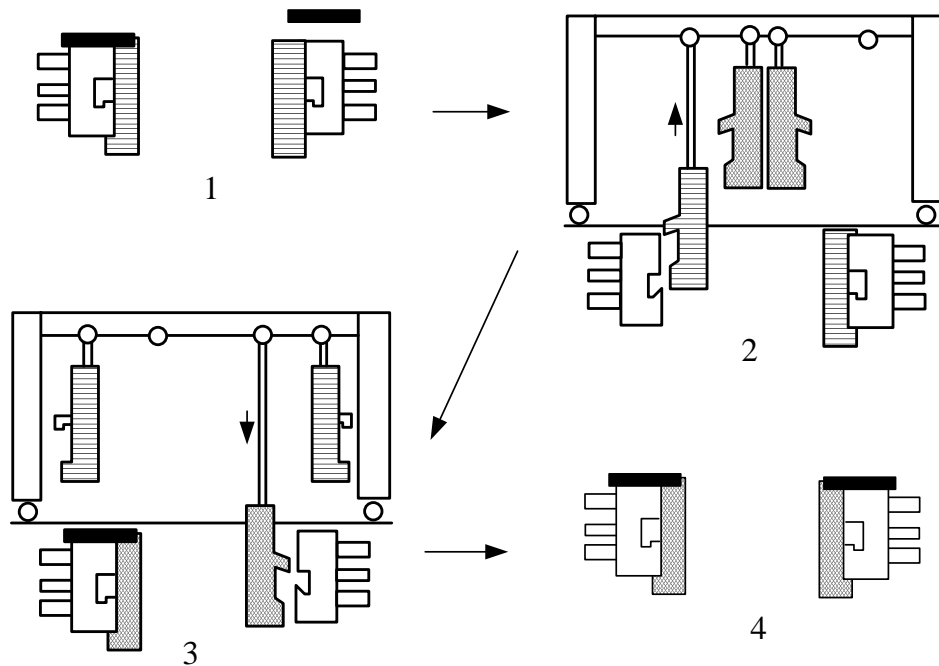


Рис. 8.6. Последовательность операций при быстрой замене узкой стенки кристаллизатора для изменения ширины сляба: 1 – удалить крышку кристаллизатора и освободить его зажим; 2 – удалить прежнюю узкую стенку; 3 – установить новую узкую стенку; 4 – затянуть зажим кристаллизатора и установить его крышку

МНЛЗ № 6 в режиме полностью автоматической эксплуатации использует интегрированную систему ЕИС. Обычно на МНЛЗ все оборудование (т.е. станция обработки стали, сталеразливочный стэнд и тележка промежуточного ковша и затравка) управляется вручную несколькими операторами. В процессе работы для управления МНЛЗ операторы связываются между собой. На МНЛЗ № 6 разливка ведется в полностью автоматическом режиме (т.е. подготовка к началу разливки, начало разливки и замена разливочных ковшей). Когда все механизмы, участвующие в производственном процессе, находятся в автоматическом режиме, компьютер автоматически подает последовательные команды управления для завершения операции. Подобная полностью автоматическая эксплуатация включает два вида режима синхронизации. Один из них – режим «компьютерной синхронизации», при котором операция начинается автоматически компьютером. Другой – «операторская синхронизация», при которой операция начинается оператором, после чего процесс продолжается в автоматическом режиме. Если все оборудование, связанное с полностью автоматической эксплуатацией, находится в автоматическом режиме, оператор может начать разливку простым нажатием на одну кнопку. Такая система управления позволя-

ет эксплуатировать МНЛЗ № 6 тремя операторами в смену. В отличие от схемы визуального контроля за машиной МНЛЗ № 6 может управляться с поста управления единственным оператором.

Для регулирования потока стали в кристаллизаторе МНЛЗ смонтировано два устройства электромагнитного перемешивания.

Многие из последних разработок в области совершенствования технологии и конструкций МНЛЗ были использованы на заводе в Квангьянге фирмы POSCO при сооружении в сотрудничестве с фирмой «Davy Distington» (Англия) новой МНЛЗ взамен трех двухручьевых криволинейных машин.

Причиной сооружения новой машины явились: планируемое сооружение толстолистового стана производительностью 1,2 млн. т/год на заводе фирмы в Поханге и покрытие образующегося в этом случае дефицита слябов в 0,4 млн. т/год, но, что не менее важно, старые криволинейные машины не обеспечивали получение нужного качества проката для производства холоднокатаного листа для лицевых деталей автомобилей и штрипса для труб большого диаметра (стан холодной прокатки производительностью 1,8 млн. т/год специально создан для производства автомобильного листа из особонизкоуглеродистых сталей).

Новая двухручьевая машина производительностью 2,8 млн. т слябов в год сечением 230×1600 мм вертикальная с изгибом (длина вертикального участка 3 м, металлургическая длина машины 42 м), имеет усовершенствованный кристаллизатор с гидравлическим приводом и электромагнитным тормозом жидкого металла (EMBR), горячим оборотом промежуточного ковша, короткое расстояние между роликами поддерживающей системы, динамическую систему охлаждения водовоздушной смесью с использованием специально очищенной воды, скорость разлива 2,2 м/мин, автоматическое управление следующими операциями:

- оборот сталеразливочного и промежуточного ковша;
- подача смесей в кристаллизаторы;
- подача аргона в промежуточный ковш;
- глубина погружения погружного стакана в кристаллизатор;
- температурный контроль в промежуточном ковше;
- определение появления шлака в струе из сталеразливочного ковша и ее перекрытие.

Все эти особенности и преимущества новой машины позволили существенно повысить качество слябов по всем показателям (содержание неметаллических включений, внутренние и наружные трещины, качество поверхности).

Первой МНЛЗ в Европе, в конструкции которой в полной мере

реализованы последние достижения фирмы VAI, явилась построенная в конвертерном цехе завода фирмы «Rautaruuki Steel» в Раахе (Финляндия) взамен старых вертикальных машин.

Максимальная скорость разливки 1,8 м/мин (толщина сляба 210 мм). Емкость промежуточного ковша 28 т, длина роликовой проводки 29,26 м. Установка оснащена полностью автоматизированным манипулятором, обеспечивающим защиту струи, гидравлическим устройством для качания кристаллизатора и полностью динамической системой для мягкого обжата заготовки.

В процессе мягкого обжата заготовки обеспечивается ее сдавливание непосредственно перед точкой конечного затвердевания и при этом уменьшаются осевая ликвация и пористость. Согласно литературным данным мягкое обжатие надо обеспечивать, когда доля твердой части в жидкотвердой сердцевине заготовки составляет 25 – 75 %. На новой установке непрерывной разливки фирмы «Rautaruuki Steel» мягкое обжатие можно осуществить автоматическим регулированием сегментов (зазора между роликами) при работе гидравлических устройств в статическом или динамическом режиме.

При работе гидравлических устройств в статическом режиме на установке обеспечивается регулирование зазора между роликами перед началом разливки. В этом случае конусность расположения роликов установки не изменяется в ходе разливки. При работе гидравлических устройств в динамическом режиме обеспечивается регулирование расположения участка мягкого обжата использованием системы управления, регулирующей зазор между роликами в сегментах, причем положение данного участка регулируется в соответствии с режимом разливки. В зоне роликовых сегментов есть четыре гидравлических цилиндра, которые автоматически регулируют величину зазора между роликами.

При динамическом мягком обжате обеспечиваются следующие преимущества:

- предотвращается или значительно уменьшается осевая ликвация;
- обеспечивается надежное производство заготовок из сталей требуемого сортамента;
- значительно понижается водородное растрескивание стали и повышается качество заготовок из сталей, используемых для производства деталей морских буровых платформ, причем в этих заготовках обеспечивается определенная степень осевой ликвации;
- понижается отбраковка толстого листа из-за осевой ликвации;
- обеспечивается меньшая осевая ликвация отливаемой заготовки

в начале и в конце разливки, а также при возникновении помех в ходе разливки.

Устройства «DyncoolG» и «SMART6» управляют процессами вторичного охлаждения и мягкого обжата отливаемой заготовки соответственно. «SMART6» управляет сегментами в соответствии с данными о температурном поле, рассчитанными устройством «DyncoolG». Динамические данные о технологическом процессе обеспечивает система управления «Damatic», которая соединена с заводской системой управления и базой данных.

В случае динамического режима мягкого обжата программа определяет следующие параметры, от которых зависит конусность системы роликов установки непрерывной разливки (рис. 8.7):

- параметры a и b ;
- максимальная скорость обжата в зоне обжата;
- величина обжата в зоне обжата.

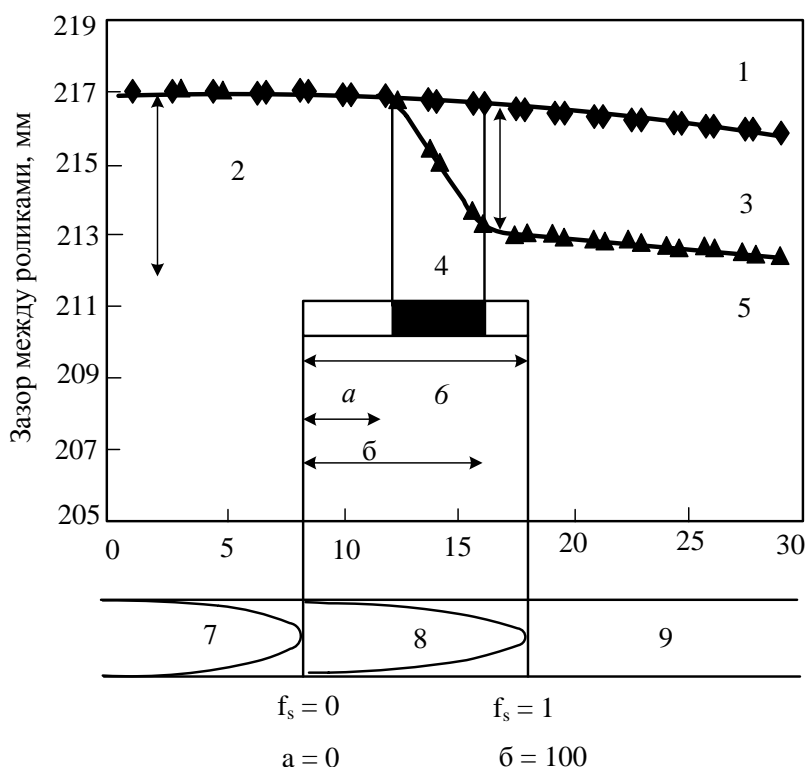


Рис. 8.6. Длина области мягкого обжата: 1 – усадка при затвердевании; 2 – общая величина мягкого обжата; 3 – величина обжата в зоне обжата; 4 – зона обжата; 5 – динамический зазор; 6 – область затвердевания; 7 – участок жидкого состояния; 8 – участок твердожидкого состояния; 9 – участок твердого состояния

Параметры a и b – начальная и конечная точки зоны динамическо-

го мягкого обжатия. В системе управления установкой длина твердо-жидкой зоны составляет 100 единиц. Параметр a может быть больше 0, а параметр b меньше 100. Параметры a и b не указывают долю твердой части в твердожидком участке. При $a < 0$ сдавливание отливаемой заготовки начинается до твердо-жидкого участка в центральной области, а если $b > 100$, то обжатие заканчивается после точки, в которой отливаемый сляб полностью затвердевает. В случае, показанном на рисунке 8.7, $a = 45$, $b = 80$.

При отливке слябов сечением $210 \times (1250-1475)$ мм минимальная осевая ликвация соответствовала $a = 50$, $b = 92$.

При отливке слябов размером 210×1825 мм наименьшая степень ликвации была, если обжатие начинали при $a = 33$, а заканчивали при $b = 88$.

При проведении экспериментов ставили также задачу изучить влияние величины обжатия, которая изменялась от 1,5 до 2,7 мм, и обнаружили, что степень осевой ликвации понижается при уменьшении величины обжатия. Однако было отмечено, что полученная зависимость была не вполне четкой; в частности, при разливке одной из плавок с обжатием заготовки 2,7 мм степень осевой ликвации составила всего 0,11 %. Исходя из данных этих экспериментов, пришли к выводу, что оптимальная величина обжатия заготовки в зоне обжатия составляет 1,5 мм.

Исходя из результатов экспериментов по мягкому обжатию заготовок, были сделаны следующие выводы:

- динамическое мягкое обжатие не ухудшает качества поверхности сляба при максимальной скорости обжатия заготовки менее 1,0 мм/мин в зоне обжатия;

- при обеспечении динамического мягкого обжатия заготовок наилучшие результаты достигались при $a = 50$ и $b = 92$;

- не было отмечено четкого влияния величины обжатия заготовок в зоне обжатия на степень осевой ликвации. Результаты проведенных экспериментов показали, что условия разливки, изменение скорости разливки, перегрев и размер отливаемых слябов влияют на осевую ликвацию.

Фирма «Sollac Fos Sur Mer» решила преобразовать криволинейную двухручьевую слябовую МНЛЗ № 2 в вертикальную с изгибом (длина вертикальной части 2,67 м) с целью усовершенствования качества продукции и выполнения строгих требований, предъявляемых к листу, который используется при производстве внешних автомобильных деталей.

При реализации этого проекта фирма «Voest-Alpine Industrie anla-

genbau» разработала экономичное техническое решение, позволившее преобразовать криволинейную МНЛЗ в вертикальную с изгибом с обеспечением максимального использования существующего оборудования.

МНЛЗ была остановлена всего на 9 дней, в процессе остановки фирма «Sollac Fos Sur Мег» также установила дополнительный сегмент, чтобы можно было увеличить скорость разливки примерно на 7 % и соответственно повысить производительность установки.

Основные технические данные новой МНЛЗ:

Количество ручьев	2
Толщина сляба, мм	233
Ширина сляба, мм	1050-2200
Металлургическая длина, м	28,564
Длина вертикальной части, м	2,672
Масса ковша, т	355
Радиус изгиба, м	8/12,5

Кроме превращения криволинейного кристаллизатора в прямой установили также новые механические эксцентриковые устройства качания кристаллизаторов, обеспечили уравнивание качающейся массы с использованием цилиндрических пружин и внедрение других новшеств, разработанных фирмой «Voest-Alpine Industrieanlagenbau GmbH».

Во всех вновь поставленных сегментах были установлены ролики с малым внутренним диаметром и промежуточной опорой, с малым расстоянием между ними, системы SMART, что позволило уменьшить выпучивание заготовок и свести к минимуму деформацию роликов и повысить качество слябов.

Качество слябов, производимых на МНЛЗ, и полосы в рулонах, получаемой из этих слябов, тщательно изучалось отделами обеспечения качества фирм «Sollac Fos sur Мег» и «Sollac Florange». Результаты этого изучения следующие:

- форма слябов улучшилась, пораженность внутренними трещинами осталась без изменений, хотя скорость разливки после модернизации увеличилась при разливке сталей большинства марок;
- не произошло существенных изменений в количестве поверхностных трещин;
- количество неметаллических включений в слябах из низкоуглеродистых сталей уменьшилось на 90 %, количество дефектов типа плен в горячекатаных изделиях уменьшилось более чем на 80 %.

Основные задачи при проведении модернизации: существенное повышение чистоты слябов и уменьшение количества дефектов в получаемой полосе в рулонах и оцинкованной полосе были полностью выполнены.

На другом заводе той же фирмы «Sollac» во Флоранже при реконструкции слябовой МНЛЗ в двухручьевую криволинейную блюмовую (сечение блюма 260×320 мм) также применили мягкое обжатие с целью уменьшения пористости и степени сегрегации в блюмах из сталей для изготовления рельсов и кордной проволоки. С помощью математической модели кристаллизации, разработанной IRSID, и данных о температуре поверхности блюмов в зоне вторичного охлаждения были определены первоначальные граничные условия «мягкого охлаждения». Данные расчетов были затем проверены инициированием образования трещин в зонах разгиба и мягкого обжатия посредством рассогласования положения роликов. В процессе этих испытаний, а также испытаний с отливкой блюмов с разной скоростью были внесены два изменения: длина зоны разгиба была увеличена с 1,7 до 2,5 м, а скорость разливки – с 0,8 до 0,85 м/мин. При меньшей скорости уменьшалась пористость при мягком обжатии, но не изменялась степень сегрегации, при большей скорости не обнаруживалось влияния ни на сегрегацию, ни на пористость, так как кристаллизация заканчивалась после зоны мягкого обжатия. Мягкое обжатие выполнялось посредством механического поджатия роликов с уменьшением зазора между двумя последовательно расположенными парами роликов на 0,9 мм.

Аналогичным образом была реконструирована криволинейная МНЛЗ в Брукхаузене фирмы «Thyssen Krupp Stahl», которая после 17 лет эксплуатации уже не удовлетворяла требованиям получения качественного холоднокатаного листа для автомобилестроения и другого ответственного назначения (толщина листа менее 0,25 мм). Модернизация этой МНЛЗ в вертикальную с изгибом (длина вертикального участка 2,5 м) с уменьшением расстояния между роликами вторичной системы охлаждения и в целом ее более тщательной регулировки, введением в действие современной системы автоматического управления процессом разливки позволила резко уменьшить загрязненность металла неметаллическими включениями и обеспечить производство металла не только для высококачественного автолиста, но и для теневого масок телевизоров тоньше 0,18 мм.

В наибольшей степени отвечающей требованию производства высококачественной толстолистовой стали является введенная в строй в конвертерном цехе завода фирмы «AG der Dillinger Hutte» новая МНЛЗ № 5, на которой отливают заготовки сечением 2200×(300-400) мм, при

отливке заготовок толщиной 400 мм продолжительность разливки составляет 45 мин.

Фирма «Dilinger Huttenwerke» специализируется на производстве толстого листа. В ее производственный сортамент входят стали для стальных конструкций и судостроения, машино- и агрегатостроения, а также специальные, в частности для магистральных трубопроводов, строительства в прибрежном шельфе и котлостроения. Другой важной областью является также производство листов для труб и сосудов, работающих под давлением в среде кислого серосодержащего газа.

Особенность производства листов в Диллингене – широкий спектр их толщин. Так, в 1998 г. были поставлены листы толщиной от 5 до 120 мм, причем основные поставки листов пришлись на толщины 20 – 40 мм. Анализ современного рынка и опросы потребителей позволяют ожидать в дальнейшем сдвигов в сторону еще большей толщины листов.

Машиностроительное обеспечение проекта выполнила фирма «SMS Schloemann Siemag AG» (теперь называется «SMS Demag AG»), Дюссельдорф. Система направления слитка состоит из кристаллизаторов первой секции, механически фиксированной на заданную толщину, и гидравлически настраиваемых секций. Секции доставляются манипуляторами на желательное место и фиксируются с помощью гидравлических анкеров. Металлургическая длина составляет 15,4 м. Расположенное под секциями изгибающе-тянущее устройство изгибает уже затвердевший слиток в два этапа. По роликовому спуску непрерывный слиток транспортируется в правильную машину, где распрямляется по двум радиусам.

При динамическом мягком обжатии требуется, чтобы его параметры настраивались «под нагрузку». Это привело к разработке секций с гидравлически позиционируемой свободной стороной. Как и при регулировании зазора между валками при прокатке, раскрытие зазора между роликками настраивается бесступенчато гидроцилиндрами (с помощью четырех гидроцилиндров на каждую секцию).

Благодаря жестким и точным направляющим для непрерывного слитка в сочетании с мягким обжатием и интенсивным вторичным охлаждением макроликвация была сокращена до минимума. Впервые реализована работа нажимных механизмов под нагрузкой в секциях вторичного охлаждения с помощью гидроцилиндров, что позволяет динамически приспособлять параметры мягкого обжатия к фактическим условиям работы МНЛЗ (динамическое мягкое обжатие).

Результаты в отношении стойкости металлов к работе в серосодержащем кислом газе, относительного сужения на перпендикулярных

образцах, вязкости в сердцевине листа и ударной вязкости на надрезанных образцах DWTТ из толстых листов доказывают, что новая МНЛЗ удовлетворяет требованиям к заготовке для проката толстых листов. Тем самым она создает прочную базу для производства высококачественных толстых листов на заводе.

Вместе с тем освоение этой МНЛЗ, как и рассмотренных выше, систематизированные исследования параметров технологии, выполненные в Японии, показали, что такие параметры, как скорость и положение зоны мягкого обжата, нужно контролировать в очень узком рабочем диапазоне, чтобы получить желаемый эффект.

В США работают несколько МНЛЗ, изготовленных фирмой VAI. Последней машиной этой фирмы является введенная в эксплуатацию в 1998 г. фирмой «Birmingham Southeast», LLC многоцелевая МНЛЗ, изготовленная «Voest-Alpine Industries», Inc., Питтсбург, годовой производительностью 800 тыс. т высококачественных сортовых, балочных заготовок и блюмов из сталей широкого сортамента, включая низкоуглеродистые, кремнистые, легированные и низкосернистые. Радиус изгиба МНЛЗ составляет 8 м, металлургическая длина – 24,4 м.

Четырехручьева многоцелевая МНЛЗ спроектирована для серийной разливки плавков массой 115 т из электропечи и содержит следующие компоненты: Д-образный промежуточный ковш максимальной емкостью 28 т; высокоскоростной «Deimold» и параболический кристаллизатор для сортовых заготовок, кристаллизатор с нормальным конусом для блюмов и балочных заготовок; механизм качания рычажного типа; секцию для балочных заготовок; секцию для сортовых заготовок/блюмов; жесткую затравку отводимого типа; четырехзонную систему вторичного охлаждения.

В России некоторой реконструкции в соответствии с современными тенденциями подверглась только одна МНЛЗ № 1 в ЭСПЦ ОАО «Северсталь». На этой МНЛЗ кристаллизаторы имеют щелевое охлаждение отдельно для каждой узкой и широкой стенки, возможность переналадки на разную ширину слитка с быстрой заменой узких стенок. Система выставки узких стенок позволяет плавно настраивать любую ширину и конусность рабочей полости кристаллизатора.

Преимущества нового кристаллизатора:

- возможность настройки конусности рабочей полости кристаллизатора по узким и широким стенкам позволяет учесть усадку охлаждаемого слитка и повысить эффективность охлаждения, что, в свою очередь, дает возможность сократить длину кристаллизатора с 1200 до 1000 мм и соответственно габарит медных стенок;

- щелевые пазы для подвода воды в медных стенках вместо свер-

ленных каналов увеличивают интенсивность охлаждения за счет повышения скорости потока воды (что позволяет уменьшить толщину медной стенки), разгружают медную стенку от термических поводок, возникающих вследствие разности температур внешней и внутренней поверхностей, дают возможность визуального контроля и чистки щелевых каналов от отложений на их поверхности.

Как было отмечено, значительное распространение получили слябовые кристаллизаторы со стенками из горячекатаной меди толщиной 70 – 80 мм, в которых высверлены каналы. Такие кристаллизаторы показывают удовлетворительные результаты при скорости вытягивания слитка 0,8 – 1,0 м/мин, а при более 1 м/мин увеличиваются износ стенок и связанное с этим количество поверхностных дефектов сляба, таких как паукообразные трещины.

При скоростях разливки 1,2 – 1,4 м/мин на верхнем горизонте поверхностного (рабочего) слоя стенки кристаллизатора толщиной 10 – 15 мм со сверленными каналами образуется зона разупрочнения материала. Средняя длина зоны достигает 150 – 170 мм от мениска, для перегретых участков – до 250 мм. При этом возможны резкое снижение износостойкости поверхностного слоя стенки, отслаивание и прилипание меди к поверхности непрерывно-литого слитка. В кристаллизаторе со щелевыми каналами при указанных скоростях зоны разупрочнения не образуются.

Используемая в качестве материала рабочих стенок кристаллизатора холоднокатаная медь, легированная серебром, более дорогая по сравнению с другими материалами для изготовления кристаллизаторов, обладает более высокими теплопроводностью и температурой рекристаллизации по сравнению с обычной медью в существовавших кристаллизаторах. Высокая теплопроводность повышает эффективность охлаждения, а высокая температура рекристаллизации обеспечивает сохранение механических характеристик меди в процессе разливки.

Взамен традиционного рычажного механизма качания применен механизм качания с гибкими направляющими (рессорами). Отсутствие шарниров в новом механизме позволяет реализовать высокочастотное качание с малой амплитудой при высокой точности воспроизведения траектории движения. Применение гидропривода для этого механизма качания позволяет легко менять не только частоту, но и амплитуду, и закон качания. Причем закон качания может существенно отличаться от синусоидального. Новые возможности механизма вместе с соответствующими шлаковыми смесями позволяют уменьшить трение в кристаллизаторе. Управление параметрами качания выполнено локальной системой управления с применением компьютера.

Диапазоны регулирования основных параметров: по частоте – 50 – 300 кач./мин; по амплитуде – 4 – 1 мм.

Новая нулевая роликовая секция, расположенная под кристаллизатором, в отличие от старой, имеющей нежесткую раму с установочными прокладками для выставки роликов, выполнена семироликовой с промежуточными опорами роликов. Конструкция секции имеет высокую жесткость и обеспечивает высокую точность настройки роликов, образующих технологический канал. При этом отклонение рабочих поверхностей роликов от плоскости в процессе работы не превышает 0,3 мм, что повышает стабильность процесса разливки.

Значительным изменениям подвергалась четырехвалковая тянущая клеть, которая ранее могла работать только по затвердевшей заготовке. Новая клеть – восьмивалковая, полноприводная с возможностью работать как по давлению, так и по положению с использованием датчиков положения подвижных валков (рис. 8.8).

В случае работы по положению валков возможны выставка и удержание клинового канала для реализации технологии регулируемого обжатия не полностью затвердевшей заготовки в двухфазном состоянии. Увеличение числа валков с четырех до восьми, установленных с шагом 450 мм, позволило рассредоточить давление прижима, а также увеличить металлургическую длину МНЛЗ с 9,3 (последний ролик роликовой секции № 4) до 11,2 м (последний ролик тянущей клетки).

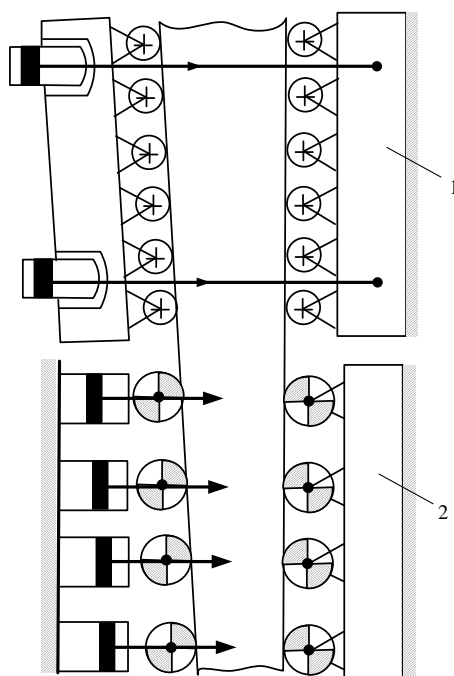


Рис. 8.8. Схема нижней части реконструированной роликовой проводки на МНЛЗ № 1: 1 – роликовая секция; 2 – тянущая клеть

Как показывают расчеты затвердевания сляба толщиной 200 мм, максимальная скорость разливки увеличивается с $9,3:15,4 = 0,6$ до $11,2:15,4 = 0,72$ м/мин. В этом случае первые два ряда валков тянущей клетки работают по заготовке с жидкой фазой.

В результате реконструкции с поставкой узлов и механизмов, соответствующих современной технологии разливки, повышено качество слитка; увеличена производительность за счет увеличения скорости вытягивания слитка и сокращения потерь на переналадку машины, замену оборудования вследствие высокой стойкости и надежности механизмов.

Эти результаты подтверждаются следующими данными, полученными после пуска реконструированной МНЛЗ:

- стойкость рабочих стенок кристаллизатора до первой перестройки достигла более 600 плавов, благодаря чему обеспечена экономия меди при изготовлении кристаллизаторов на 30 – 40 %;
- скорость вытягивания слитка выросла с 0,5 – 0,6 до 0,7 м/мин;
- отсортировка толстого листа по неметаллическим включениям снизилась в 3,6 раза;
- паукообразные и поперечные трещины практически исчезли.

Дальнейшее повышение качества заготовки и расширение марочного сортамента связаны с реконструкцией роликовой секции № 4 и выше с тем, чтобы существенно увеличить зону регулируемого обжата слитка.

В конвертерном производстве ОАО «Северсталь» программа поэтапной реконструкции всех пяти МНЛЗ предусматривает:

- реконструкцию оборудования с заменой секций дугового и криволинейного участков роликовой проводки;
- оснащение МНЛЗ кристаллизаторами с покрытиями и разделенным подводом воды на стенки кристаллизатора;
- внедрение динамической системы охлаждения слябов на всех МНЛЗ.

Реконструкция МНЛЗ позволит увеличить среднюю скорость разливки до 1,45 м/мин и производительность агрегата на 10 – 20 %. При этом достижение качественных показателей будет улучшено снижением поверхностных дефектов и уменьшением количества внутренних трещин (гнездообразных, осевых, перпендикулярных).

Таким образом, в результате поэтапной и довольно существенной реконструкции МНЛЗ с установкой новых устройств будет обеспечено:

- изменение ширины кристаллизатора;
- качание кристаллизатора с помощью рессорно-пружинных и гидравлических устройств;
- динамическое небольшое обжатие заготовки с незатвердевшей

сердцевиной;

- водовоздушное форсуночное охлаждение;

- новые системы направляющих роликов и новые конструкции роликов;

- общее компьютеризованное управление со слежением за тепловыми процессами и затвердеванием;

- компьютерное управление качеством.

При этом обеспечивают дополнительные возможности для высокой степени использования установки, повышения качества продукции, сведения к минимуму контроля слябов, подачи слябов на прокатный стан.

8.1. Вторичное охлаждение непрерывного слитка

Одним из наиболее ответственных узлов МНЛЗ является система охлаждения поверхности непрерывного слитка. Это объясняется тем, что охлаждение в ЗВО является важным звеном технологического цикла получения непрерывнолитых заготовок. От выбранного режима и способа охлаждения зависят качество поверхности непрерывного слитка, его структура, скорость вытягивания и производительность МНЛЗ. Отклонения от необходимого режима охлаждения (локальное переохлаждение, излишняя или недостаточная протяженность активного участка охлаждения, неравномерное охлаждение по периметру и длине поверхности слитка) приводят к возникновению дефектов: продольных и поперечных трещин на гранях и углах слитка; паукообразных и сетчатых трещин; нарушению геометрии слитка; внутренних дефектов (газообразных трещин; трещин, перпендикулярных узким граням и т.д.).

При прохождении через ЗВО (водяная система охлаждения) температура поверхности слитка изменяется циклически: вхождение движущегося участка слитка в поле орошения водяного факела сопровождается резким снижением температуры поверхности со скоростью до 279,5 К/с, а выход из поля – разогревом со скоростью до 275,0 К/с. Число таких термоциклов на поверхности слитка при прохождении через ЗВО соответствует числу форсунок, в результате чего при охлаждении поверхности происходит распад аустенита с образованием ферритоперлитной структуры, а при разогреве – образование аустенита.

По технологическим требованиям системы вторичного охлаждения должны иметь широкий диапазон регулирования с дифференциальным охлаждением по длине слитка, обеспечивающим непрерывное и плавное уменьшение температуры поверхности, не достигающей температуры перехода в область упругих деформаций. Системы вторичного

охлаждения (наряду с технологическими требованиями) должны быть просты по конструкции, надежны в эксплуатации, устойчивы в работе и должны использовать наиболее эффективные средства для охлаждения при минимальных энергетических затратах.

Водяные системы вторичного охлаждения с гидравлическими форсунками не удовлетворяют необходимым требованиям охлаждения слитка, так как характеризуются неустойчивыми параметрами распыления (дисперсностью капель, углом раскрытия, равномерностью распределения хладагента в поле факела и т.д.). Устойчивая работа гидравлических форсунок ограничивается диапазоном регулирования расхода воды, находящегося в пределах 1,5 – 5,0. Узкий диапазон регулирования расхода воды создает необходимость применения двух видов расходных характеристик работы форсунок в зависимости от скорости разлива. При достижении некоторого минимального значения расхода воды, ниже которого форсунки работают неустойчиво, расход оставляют неизменным, либо подачу воды прекращают. В связи с этим в водяных системах охлаждения, состоящих из секций с гидравлическими форсунками, создаются условия на отдельных участках при различных скоростях разлива для переохлаждения и разогрева поверхности слитка.

Попытка улучшения работы водяных систем вторичного охлаждения за счет стабилизации характеристик работы гидравлических форсунок путем механического воздействия на струю воды как перед соплом форсунки, так и на выходе из сопла, выбора из факела области с наилучшими характеристиками посредством установки перед соплом форсунки экрана, а также применения других способов охлаждения – испарительного, контактного и т.д. – позволила лишь частично обеспечить некоторые требования технологии охлаждения слитка, но повлекла за собой усложнение конструкций систем, потребовала увеличения энергозатрат, а при эксплуатации некоторые узлы оказались ненадежными в работе.

Водовоздушное охлаждение обеспечивает гибкий и широкий диапазон интенсивности вторичного охлаждения за счет возможности изменения соотношения расходов воды и воздуха и смеси от 0 до 100 %. Существующие устройства и системы водовоздушного охлаждения различаются способами формирования и подачи водовоздушной смеси на охлаждаемую поверхность, по этим признакам их можно разделить на системы с внешним смешением потоков воды и воздуха вне сопла форсунок, с внутренним смешением потоков воды и воздуха на незначительном удалении от форсунки или непосредственно перед выходным отверстием сопла внутри форсунки, системы с предварительным формированием водовоздушной смеси в виде эмульсии в специальных сме-

сительных устройствах и транспортировкой ее по трубопроводам и коллекторам к гидравлическим форсункам, а также секционные и дифференциальные водовоздушные системы. В секционных системах вся зона вторичного охлаждения состоит из секций, в которые входит пять и более форсунок-распылителей, и каждая секция конструктивно имеет одинаковый расход водовоздушной смеси на каждую форсунку. В дифференциальных системах водовоздушного охлаждения обеспечивается требуемая подача смеси с необходимым соотношением воды и воздуха отдельно на каждую форсунку.

Схема системы водовоздушного охлаждения внешнего смешения представлена на рис. 8.9. В ней использован эффект дробления водяных струй в результате их столкновения с высокоскоростным потоком воздуха непосредственно в зоне охлаждения. Широкое применение системы затруднительно из-за формирования хладагента в виде облака над поверхностью заготовки, что приводит к малой эффективности его использования, не обеспечивается также требуемый диапазон регулирования интенсивности охлаждения. Для обеспечения устойчивой работы системы необходимы значительные расходы воздуха (более $150 \text{ м}^3/\text{м}^3$ воды).

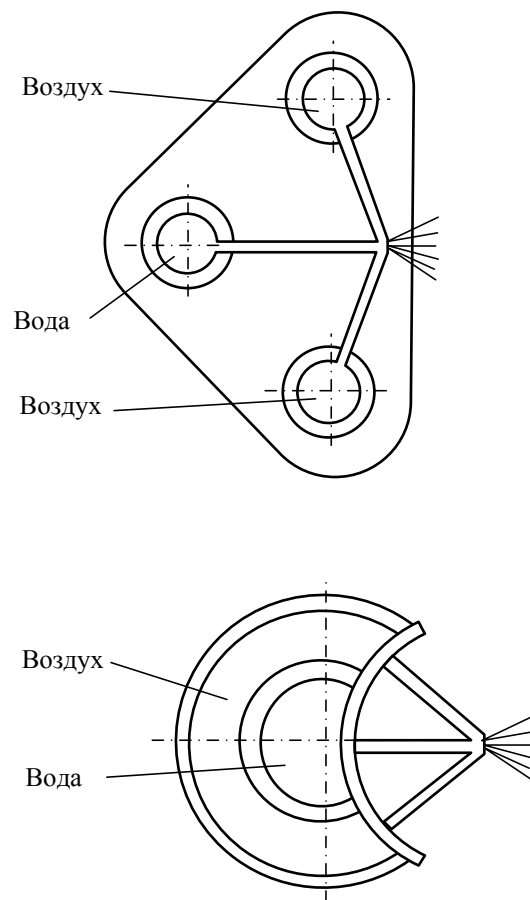


Рис. 8.9. Схема системы водовоздушного охлаждения внешнего смешения

Наиболее широкое промышленное применение нашли системы с внутренним смешением воды и воздуха перед выходным отверстием форсунки (рис. 8.10).

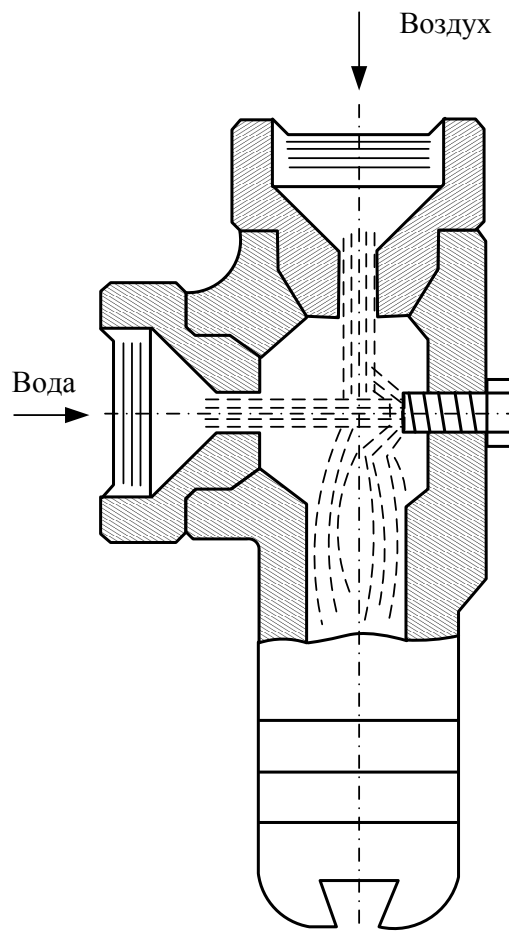


Рис. 8.10. Схема системы водовоздушного охлаждения с внутренним смешением перед выходным отверстием

Если к каждому такому распылительному устройству подводить воду и воздух с индивидуальной регулировкой расходов, то можно получить дифференциальную систему водовоздушного охлаждения (рис. 8.11). Наряду с возможностью гибкого регулирования интенсивности охлаждения по длине активной зоны орошения по любому требуемому закону, такая система за счет того, что к каждому распылительному устройству требуется двойная разводка трубопроводов с индивидуальным комплектом контролирующего и регулирующего оборудования, сложна по конструкции и применение ее целесообразно там, где требуется небольшое количество распыляющих устройств.

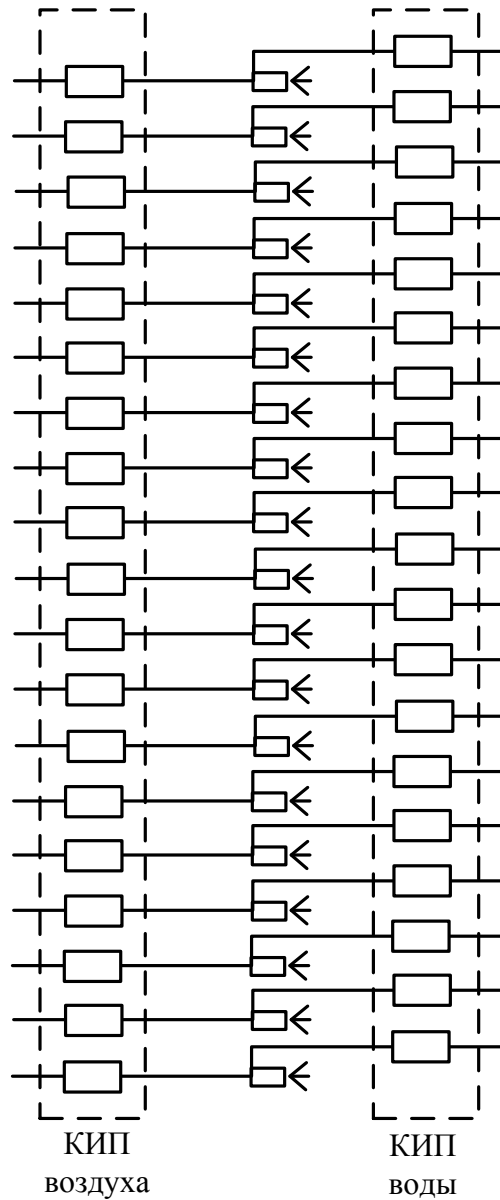


Рис. 8.11. Схема дифференциальной системы водовоздушного охлаждения

Для уменьшения числа контрольно-регулирующего оборудования воду и воздух подают через коллекторы на группу распыляющих устройств, образующих управляемую секцию (рис. 8.12).

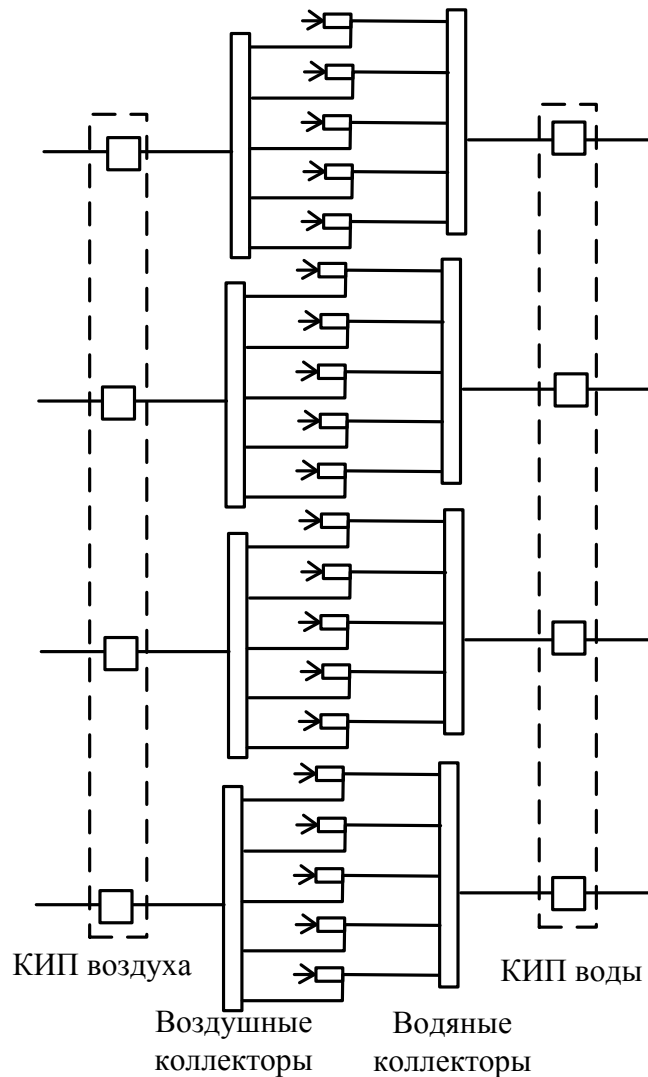


Рис. 8.12. Схема секционной системы водовоздушного охлаждения

Эту же задачу выполняет коллектор-секция, выполненная в виде двух коаксиально расположенных труб с соосным расположением форсунок. По внутренней трубе подают воду, а по наружной – воздух (рис. 8.13). Разработанные системы позволяют уменьшить число средств регулирования, но имеют высокую металлоемкость, а наличие смесительного устройства перед каждой форсункой и высокие требования к конструктивным размерам при изготовлении и сборке затрудняют обслуживание системы при большом числе форсунок.

Другая коллектор-секция (рис. 8.14) представляет собой элемент системы с предварительным формированием водовоздушной смеси, ее равномерным распределением по гидравлическим форсункам коллектора и состоит из смесительного устройства, представляющего собой пневма-

тическую форсунку, делителя, проходя через который водовоздушная смесь из однолинейного потока разделяется на несколько равномерных потоков, гидравлических распылителей-форсунок, соединенных с делителем патрубками, по которым транспортируется водовоздушная смесь.

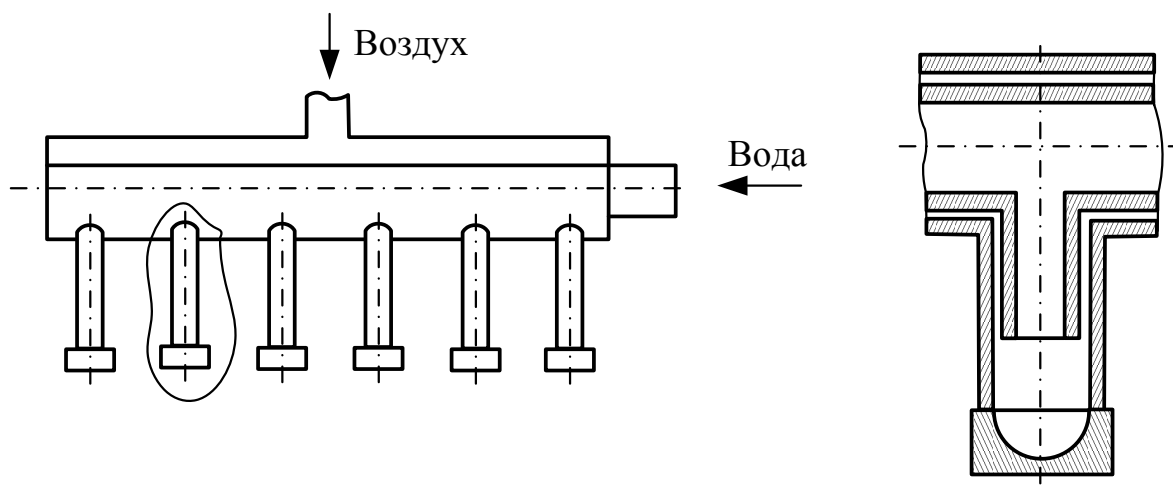


Рис. 8.13. Схема коллектора-секции водовоздушного охлаждения

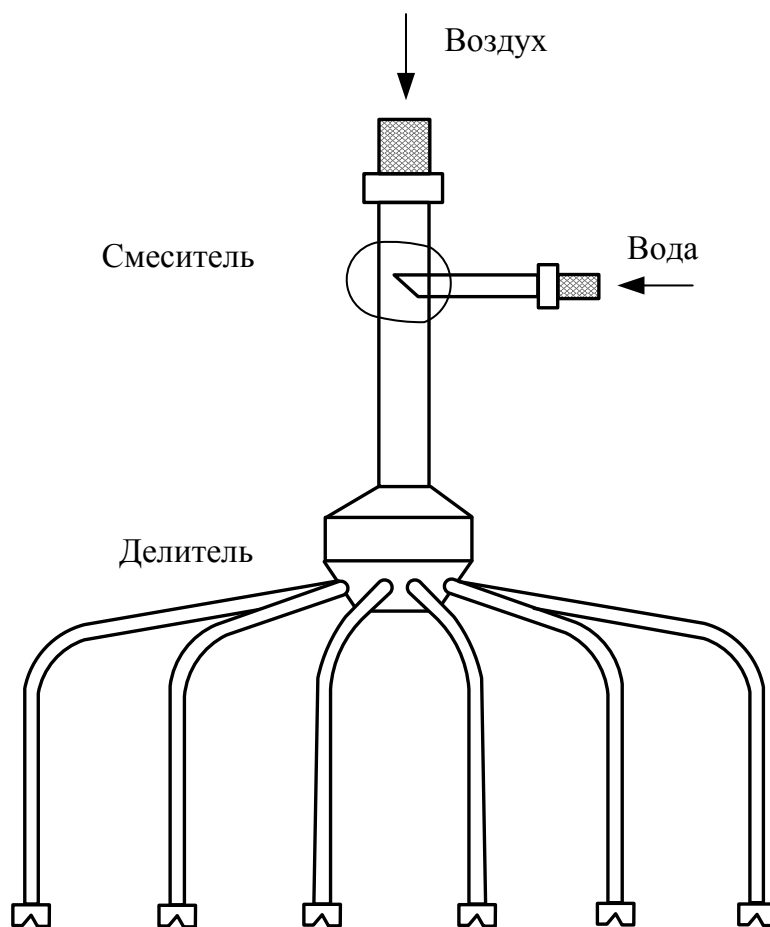


Рис.8 14. Схема коллектора-секции водовоздушного охлаждения

Число гидравлических распылителей-форсунок в коллекторе 5 – 10. Использование этих коллекторов позволило несколько снизить металлоемкость системы, но расположение смесительных устройств, делителей в горячей зоне затрудняет их обслуживание при эксплуатации, а необходимость использования делителя усложняет конструкцию и требует дополнительных средств при изготовлении делителя и сборке коллектора.

С технологической точки зрения основным недостатком вышеперечисленных систем является затрудненное получение дифференциального распределения хладагента по длине охлаждаемой поверхности слитка.

Возможность получения монотонного распределения интенсивности охлаждения по длине слитка и максимальное приближение по своей характеристике к дифференциальному распределению хладагента по длине ЗВО обеспечиваются блочной системой водовоздушного охлаждения с предварительной подготовкой и формированием смеси, ее

транспортировкой по трубопроводу к блоку соединенных между собой коллекторов с гидравлическими форсунками (рис. 8.15). В этой системе в зависимости от конструктивно-технологических параметров, включающих схемы соединения коллекторов в блоки и подвода к ним водовоздушной смеси, а также расходных характеристик воды и воздуха, можно получить различные варианты законов распределения хладагента в форсунках по длине коллектора.

На рис. 8.16 показано распределение среднеинтегральной температуры на поверхности слитка t_n в межроликовом пространстве при водовоздушном секционном охлаждении. Кривая 1 характеризует t_n слитка в первых форсунках секции, а изменение температуры поверхности при блочном водовоздушном охлаждении показывает кривая 2. Более детальная картина качественного изменения температуры поверхности по длине слитка в зависимости от распределения хладагента по длине ЗВО в блочной и секционной системах водовоздушного охлаждения показана на рис. 8.17.

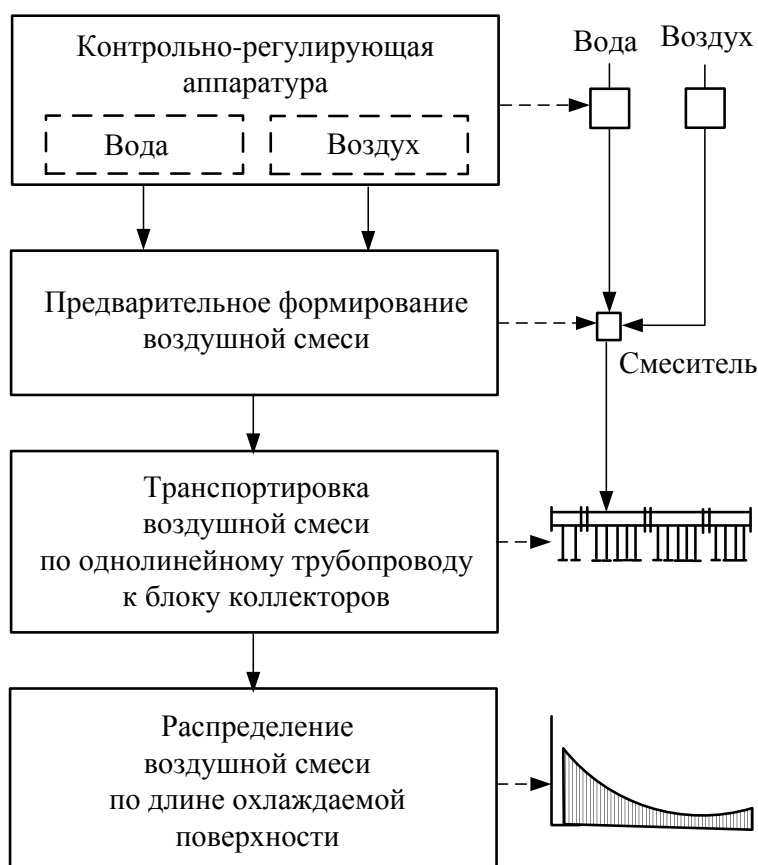


Рис. 8.15. Схема блочной системы водовоздушного охлаждения с предварительным формированием смеси

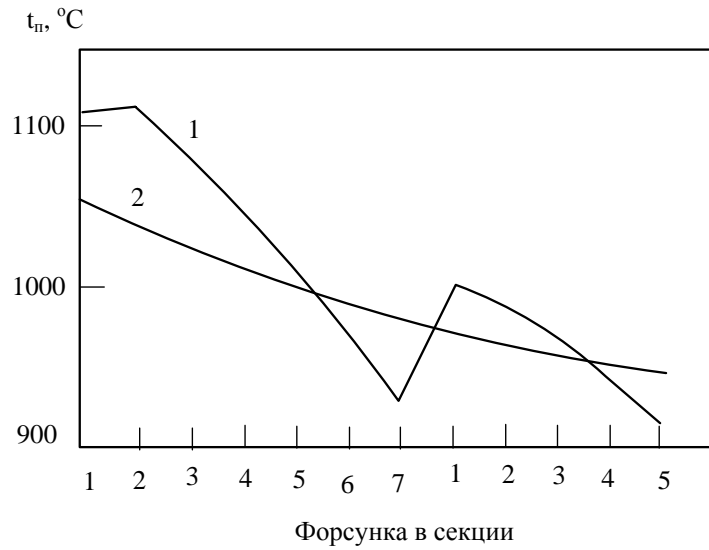


Рис. 8.16. Распределения среднеинтегральной температуры на поверхности слитка: 1 – секционная система; 2 – блочная система

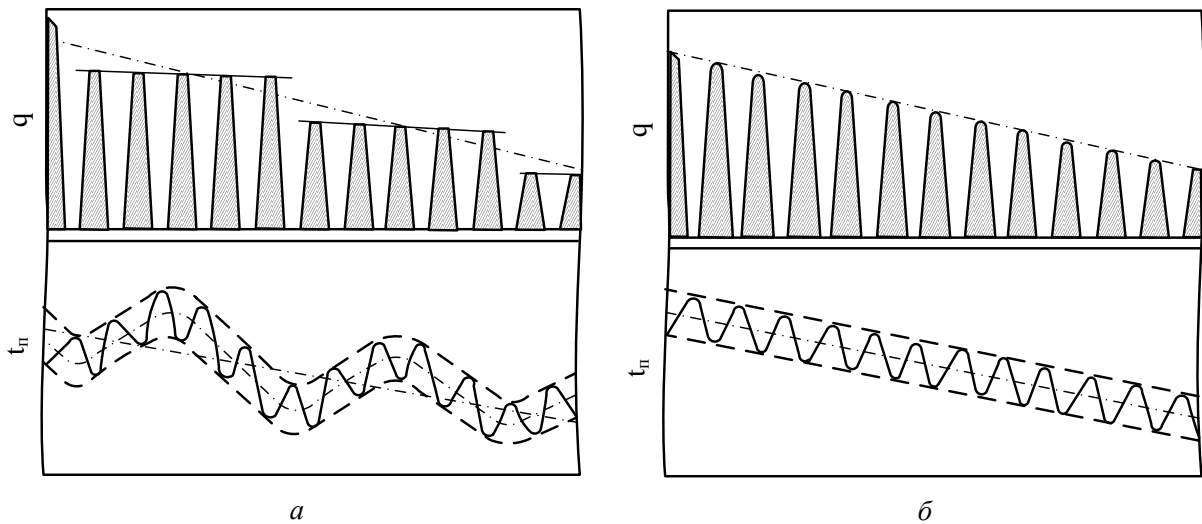


Рис. 8.17. Схема распределения хладагента и температуры по длине охлаждаемой поверхности слитка при водовоздушном охлаждении: а – секционная система; б – блочная система; q – плотность орошения

При разработке систем с предварительным формированием смеси в смесительных устройствах и транспортировке подготовленной смеси к гидравлическим форсункам по трубопроводам, коллекторам и патрубкам, в том числе блочной системы водовоздушного охлаждения, необходимо учитывать особенности структуры двухфазного потока, которая определяется режимами движения водовоздушной смеси.

Это вызвано тем, что при определенных условиях в этих системах

происходит нестабильный пульсационный режим работы форсунок в результате расслоения водовоздушной смеси на воду и воздух, вызванный периодической подачей воды и воздуха к форсункам. Знание этих условий позволит обеспечить для систем с предварительным формированием смеси устойчивый режим работы форсунок.

Характер структуры двухфазного потока зависит от коэффициента объемного воздухо содержания, скорости движения водовоздушной смеси, а также от гравитационных сил. На рисунке 8.18 приведена схема основных режимов движения водовоздушной смеси в трубопроводах. Водяной режим с небольшими включениями воздуха (вариант 1) возникает по мере увеличения коэффициента объемного воздухо содержания β до 0,2:

$$\beta = Q_{\text{возд}} / (Q_{\text{вод}} + Q_{\text{возд}}), \quad (8.1)$$

где $Q_{\text{возд}}$, $Q_{\text{вод}}$ – расходы воздуха и воды соответственно, м³/с.

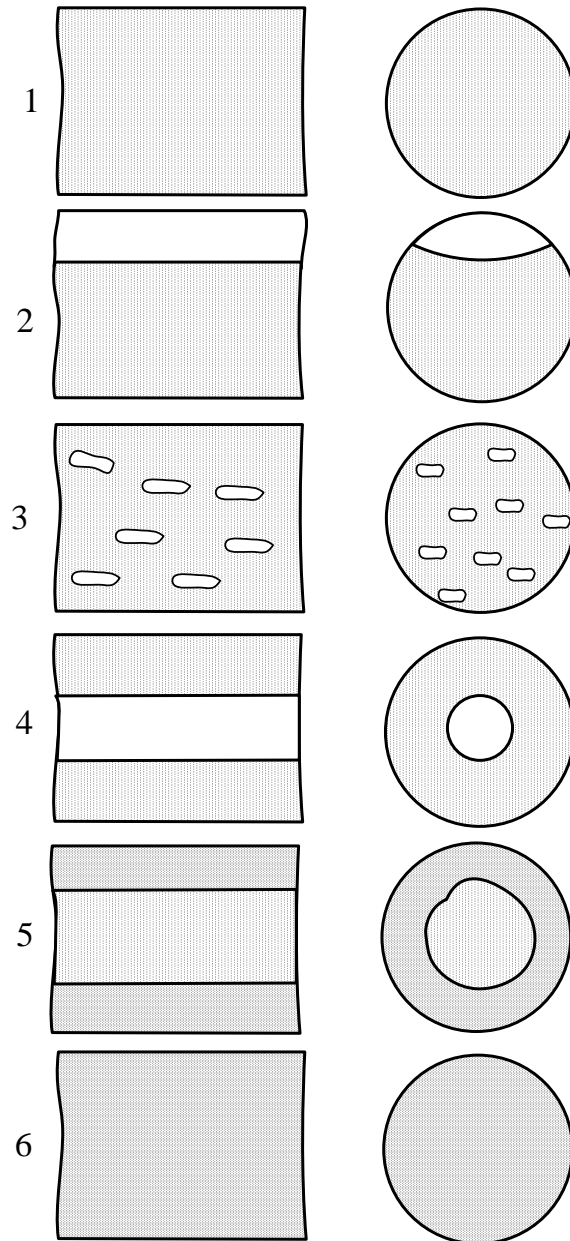


Рис. 8.18. Схемы основных режимов движения водовоздушной смеси: 1 – водяной режим с небольшими воздушными включениями; 2 – лотковый, расслоенный режим; 3 – снарядный режим; 4 – пленочный, периферийный «стержневой» режим; 5 – пленочно-эмульсионный режим; 6 – эмульсионный режим

Лотковый расслоенный режим (вариант 2) появляется при движении потока со скоростью более 1 м/с. При объемном воздухосодержании смеси 0,2-0,45 в вертикально расположенных трубопроводах лотковый режим отсутствует. С повышением скорости движения смеси расслоенный режим переходит в снарядный (вариант 3). При дальнейшем увеличении объемного воздухосодержания смеси до 0,6 м/с и скорости движения потока до 3 м/с в центральной части проскакивают длинные

пузыри с эллиптической головкой и плоско-срезанным концом. При увеличении скорости потока до 5 м/с снарядный режим переходит в пленочно-периферийный, называемый также стержневым (вариант 4). В этом случае отдельные снаряды сливаются в один поток, окруженный водяным кольцом. Разновидностью стержневого режима, имеющего место при больших скоростях движения смеси (до 10 м/с), является режим, при котором возникают жидкостные включения в центральном воздушном стержне, так называемый пленочно-эмульсионный режим (вариант 5). Увеличение скорости движения смеси более 10 м/с и объемного водородсодержания смеси более 0,6 обеспечивает устойчивый эмульсионный режим (вариант 6). Наличие неустойчивой работы форсунок обусловлено лотковым и снарядным режимами движения водовоздушной смеси в трубопроводе. Для обеспечения устойчивой работы форсунок при разработке систем с предварительным формированием смеси и транспортировке ее к форсункам необходимо выбирать такие конструктивные схемы систем, диаметры трубопроводов, коллекторов, патрубков в системах и задавать такие расходные характеристики, давление воды и воздуха, которые позволяют в процессе транспортировки смеси обеспечить эмульсионный режим за счет создания скорости транспортировки смеси более 10 м/с. В критических случаях допускается пленочно-эмульсионный или стержневой режим, что соответствует скорости транспортировки смеси 5 – 10 м/с. Не допускается получение снарядного и лоткового режимов.

8.2. Форсунки и распределение охладителя по длине непрерывного слитка

При непрерывной разливке стали широкое применение нашли гидравлические форсунки, обеспечивающие получение качественных слябовых и сортовых заготовок. Веерные (плоскофакельные) форсунки выполняют одно- и многосопловыми для охлаждения широких граней слябовых и сортовых заготовок; для охлаждения узких граней – круглофакельные с завихряющими вкладышами (шнеками).

Типичная односопловая форсунка показана на рис. 8.19, *а*. Поток жидкости в ней при встрече с внутренней канавкой как бы разделяется на три направления: одна часть жидкости продолжает движение вдоль оси форсунки, другая разбивается на два потока, которые начинают двигаться навстречу друг другу. При выходе из соплового отверстия образуется плоский факел, угол расширения которого формируется внешней канавкой, а угол раскрытия вдоль длинной оси – внутренней.

На рисунке 8.19, *б* показана многосопловая плоскофакельная струйная форсунка, проекции длинных осей которой расположены ра-

диально. Иногда многосопловые веерные форсунки выполняют с наклонными каналами (см. рисунок 8.19, в).

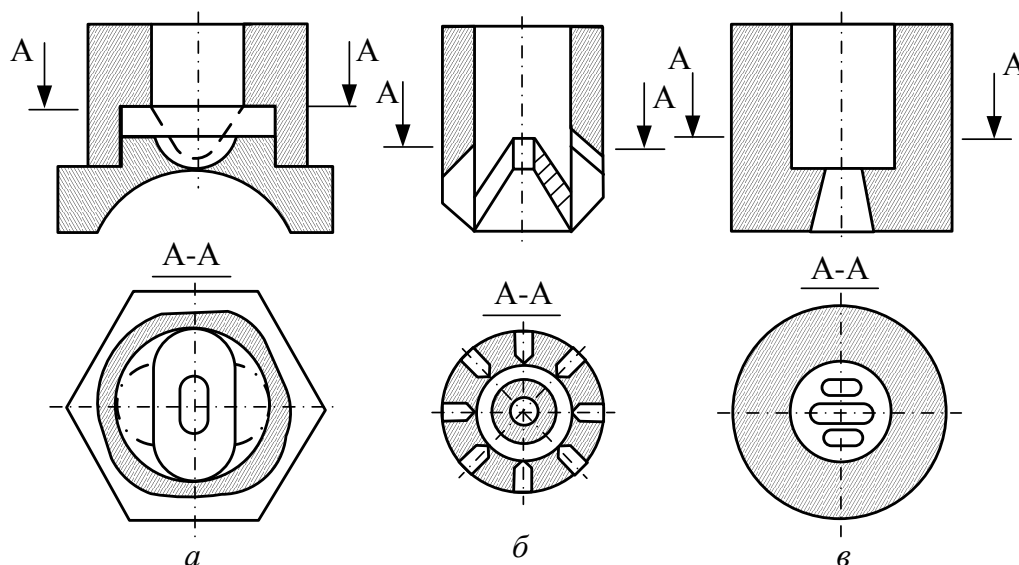


Рис. 8.19. Схема плоскофакельных струйных форсунок: а – односопловая; б – многосопловая с радиальной ориентацией сопел; в – многосопловая с наклонной ориентацией сопел

Представляет интерес конструкция струйной плоскофакельной форсунки (рис. 8.20). Перед выходным щелевым соплом, выполненным в сферической насадке, установлена с некоторым зазором шаровая вставка. Обтекая по этому зазору вставку, жидкость делится на два потока, которые сталкиваются перед сопловым отверстием (рис. 8.20, а). При этом жидкость дополнительно турбулизуется и, покидая сопловый канал, образует плоскую струю, распадающуюся на более мелкие капли. Угол образующегося факела вдоль главной оси (рис. 8.20, б) определяется простым соотношением: $\alpha = 2\arccos(R - H)/R$.

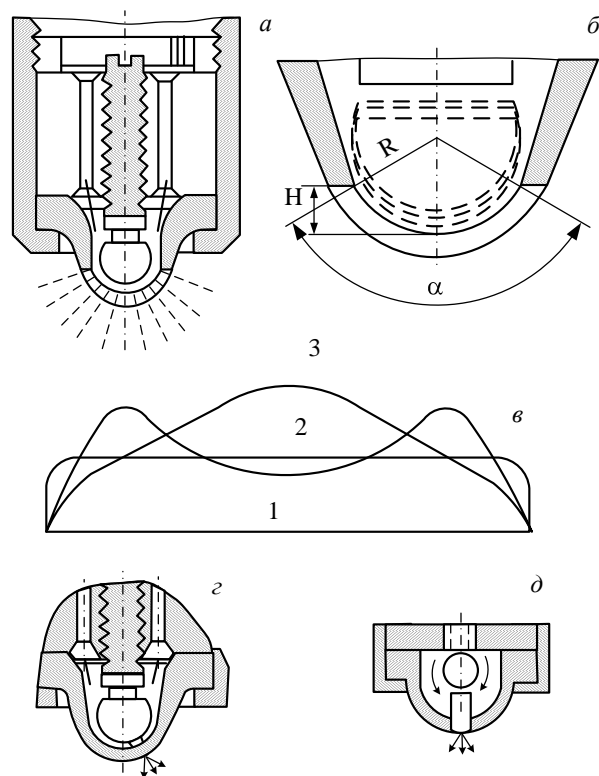


Рис. 8.20. Струйная плоскофакельная форсунка: а – с шаровой вставкой; б – различные положения шаровой вставки относительно соплового канала; в – кривые (1 – 3) распределения жидкости в зависимости от положения вставки; з – со смещенным щелевым соплом; д – с обтекаемым цилиндром

Сферическая вставка укреплена на регулировочном винте и может перемещаться в осевом направлении, что позволяет в значительных пределах регулировать характер распределения жидкости. Угол факела изменяется при этом незначительно.

Кривые 1, 2 и 3 на рис. 8.20, в соответствуют положениям вставки, показанным на рис. 8.20, б, т.е. при максимальном удалении сферы от соплового канала максимальная плотность орошения наблюдается в центре (кривая 3); при приближении сферы наступает момент, когда распределение становится более ровным (кривая 2); при дальнейшем приближении вставки максимум плотности орошения перемещается к периферии (кривая 1). Таким образом, обтекаемая вставка перед сопловым каналом позволяет, с одной стороны, улучшить дробление жидкости, с другой, регулировать характер ее распределения в факеле распыления.

На рис. 8.20, з показана форсунка со смещенным щелевым соплом. Такая конструкция может найти применение, когда факел распыления необходимо отклонить от осевого направления. В другом вариан-

те (рис. 8.20, д) в сферической камере перед сопловым каналом устанавливают обтекаемый цилиндр. Характер распределения изменяют поворотом цилиндра в горизонтальной плоскости, этого же можно достичь подбором формы обтекаемого тела. Подобный принцип может быть реализован и для пневматического распыления.

8.3. Снабжение МНЛЗ водой и ее очистка

Бесперебойная работа систем форсуночного охлаждения непрерывнолитой заготовки, охлаждения роликов, кристаллизаторов зависит от качества используемой воды. Грязная и слишком жесткая вода, несоответствующие материалы трубопроводов и недостаточные очистные устройства приводят уже через некоторое время эксплуатации к засорению форсунок, образованию накипи в каналах кристаллизаторов и роликов, что вызывает нарушение процесса непрерывной разливки и аварии. Засорение форсунок приводит в лучшем случае к неравномерному охлаждению слитка, в худшем случае к прорыву (жидкий металл вытекает из сердцевины незатвердевшей заготовки) вследствие отсутствия охлаждения. В зависимости от качества воды для региона, где строятся МНЛЗ, должен быть выполнен расчет отдельных холодильных и очистных агрегатов. На всех металлургических предприятиях производственные сточные воды, циркулирующие по разомкнутому контуру, направляются в циклон, где осаждаются грубые грязные частицы (окалина), попадают в отстойник и в фильтр грубой очистки, а затем вода для системы вторичного охлаждения через фильтр тонкой очистки подается по трубопроводам в ЗВО. Чтобы предотвратить загрязнение воды пылевыми частицами из атмосферы, ее не направляют через градирню. Вода для охлаждения роликов поддерживающей системы проходит через фильтр грубой очистки и подается на градирню. Вода для охлаждения кристаллизаторов имеет собственный замкнутый контур, а также электронасосы, прочее необходимое оборудование, фильтры грубой и тонкой очистки. Вода должна обладать следующими свойствами после прохождения фильтров тонкой очистки:

Осаждаемые и взвешенные вещества ...	до 5 мг/кг
Общая жесткость воды	15 – 16 ⁰ мг/кг
Карбонатная жесткость	4 – 6 м-экв/кг
Масла и жиры	4 мг/л.

Несмотря на хорошее качество воды, каждая зона форсуночного охлаждения (коллектор или отдельная водовоздушная форсунка) долж-

на иметь фильтр в виде легкодоступной сетки. Все трубопроводы между сеткой и форсунками изготавливают из коррозионностойкой стали, так как даже короткий участок трубопровода из обычной стали может привести к засорению форсунок. Размер ячеек для сетки составляет $0,3 \cdot 10^{-3}$ м. Чистку сеток производят не реже одного раза в неделю, но этот интервал может меняться в зависимости от состояния фильтров тонкой очистки. Система вторичного охлаждения находится под постоянным контролем. К нему относятся техническое обслуживание насосов, фильтров, контроль и чистота сеток и контроль форсунок, выверка которых по отношению к непрерывнолитой заготовке должна производиться тщательно. Перед введением в эксплуатацию системы форсуночного охлаждения, кристаллизаторов, роликов они должны промыться максимально допустимым количеством воды, чтобы вымылись всевозможные загрязнения, попавшие в трубопроводы при монтаже. При этом форсунки должны быть сняты, отсоединены подводящие рукава от кристаллизаторов и роликов.

8.4. Поддерживающая система слитка в ЗВО

Поддерживающая система слитка в ЗВО состоит из опорных элементов и устройств. Опорные элементы предотвращают деформацию граней слитка под действием ферростатического давления. Непосредственно под кристаллизатором, где оболочка слитка 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 кристаллизации. Установлено, что при размере граней слитка до 0,30 м опорные элементы можно располагать только под кристаллизатором. При отливке слябов шириной более 0,60 м опорные элементы должны располагаться по всей длине системы вторичного охлаждения. Первые опорные элементы выполняют в виде холостых роликов, которые располагают по широким граням сляба. Расстояние между осями роликов составляет 0,20 – 0,25 м при их диаметре 0,15 – 0,18 м. В зазор между роликами подают воду при помощи форсунок. При отливке сляба большой ширины простая роликовая система непригодна, так как ролики такого диаметра и большой длины (примерно 2,50 м) не обладают достаточной жесткостью и прогибаются под действием ферростатического давления жидкой сердцевины слитка. Увеличение диаметра роликов для повышения их жесткости вызывает увеличение расстояния между ними, что, в свою очередь, приводит к выпучиванию оболочки слитка между роликами. В связи с этим в верхней ЗВО применяют секционные водоохлаждаемые

ролики (рис. 8.21).

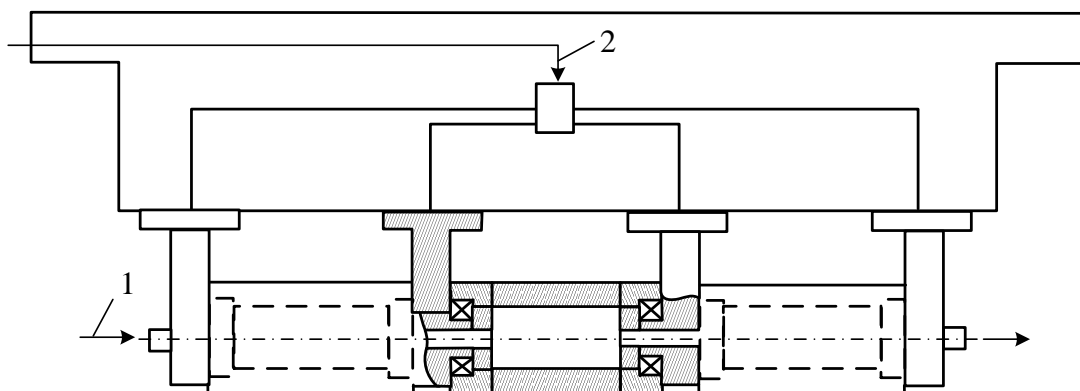
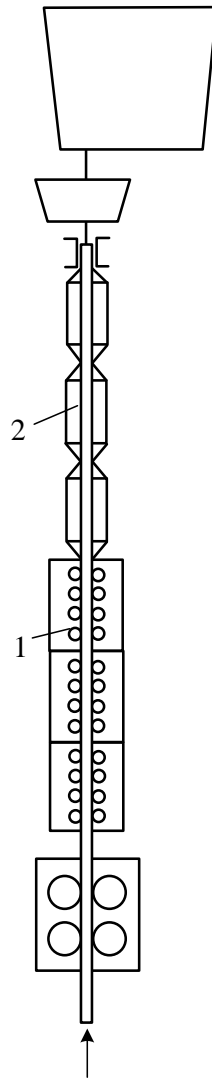


Рис. 8.21. Секционные ролики: 1 – вода; 2 – смазка

На слябовых вертикальных МНЛЗ применяют комбинированную систему опорных устройств – брусьевую в верхней части и затем роликовую (рис. 8.22).

Брусья изготавливают из чугуна. Толщину их выбирают равной 0,070 – 0,080 м, а расстояние между осями брусьев примерно 0,20 м. В пространство между брусьями на поверхность слитка подают воду или водовоздушную смесь из форсунок. Эта система характеризуется простотой конструкции, высокими эксплуатационными показателями и высокой стойкостью отдельных элементов. Установка роликов в зоне, где оболочка слитка имеет уже достаточную толщину и прочность, позволяет применять ролики такого диаметра, что они воспринимают давление металла без недопустимых деформаций. В верхней ЗВО (сразу под кристаллизатором) иногда устанавливают водоохлаждаемые медные, чугунные или стальные плиты с форсунками, которые прижимаются к слитку и создают пароводяную прослойку на его поверхности (рис. 8.23). Недостатком является быстрый износ и малая площадь охлаждения сляба при помощи форсунок. Применение поддерживающих решеток обеспечивает более эффективное охлаждение слитка и уменьшает силы трения. Наиболее эффективными являются опорные ролики, установленные в верхней ЗВО.



*Рис. 8.22. Комбинированная система опорных устройств:
1 – роликовые секции; 2 – брусевые*

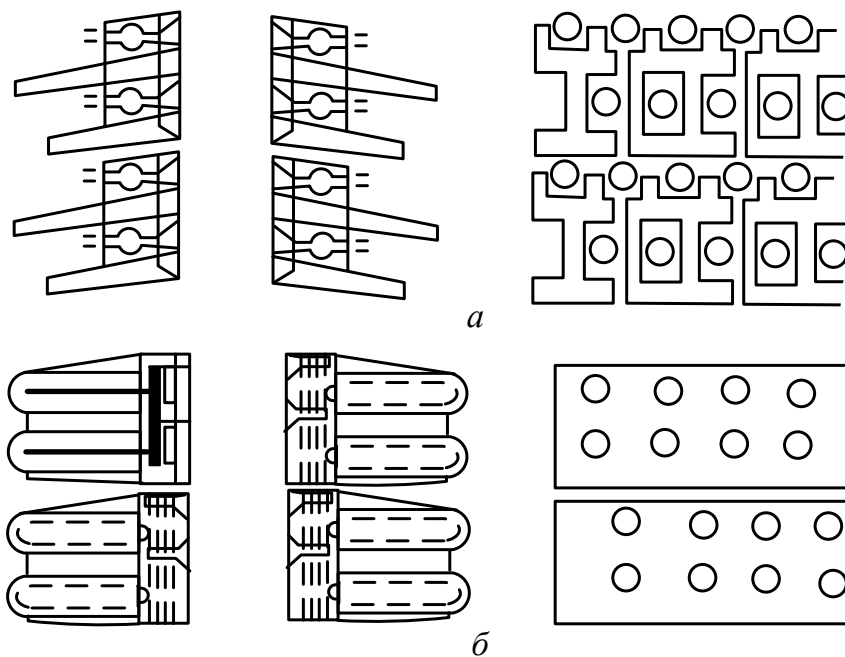


Рис. 8.23. Поддерживающие плиты и решетки: а – решетки; б – плиты

Опорная система вторичного охлаждения радиальных и криволинейных МНЛЗ по высоте состоит из нескольких сегментов, включающих верхние неприводные и нижние приводные ролики, осуществляющие также функции вытягивания слитка. Опорные ролики нижних сегментов прижимаются к слитку с усилием, соответствующим ферростатическому давлению жидкой фазы. При чрезмерном увеличении контактных усилий происходит деформация частично затвердевшего слитка, что связано с образованием внутренних трещин на границе раздела фаз. В связи с этим на МНЛЗ применяют многовалковые тянущие устройства, обеспечивающие значительное снижение контактных усилий. По типу механизмов, осуществляющих силовое воздействие роликов на слиток, различают МНЛЗ с гидравлическим и пружинно-механическим прижатием верхних роликов. Механизмы прижатия верхних роликов устраняют перегрузку роликов при удалении после прорыва металла заложенных слитков из МНЛЗ путем подъема рамы с верхними роликами над слитками. Кроме того, устройства гидравлического и пружинно-механического прижатия снижают до минимума нагрузку на ролики при прохождении через сегменты вторичного охлаждения головной (длиной примерно 0,5 м) и хвостовой (длиной примерно 0,7 м) части слитка и наплывов на его поверхности. К верхнему неприводному сегменту предъявляют повышенные требования, так как в этой зоне происходят прорывы металла, что обуславливает необходимость его быстрой замены. Кроме того, устойчивый процесс разлива при достаточно вы-

соких скоростях вытягивания возможен при точном расположении роликов по отношению к технологической оси машины ($\pm 0,3 \cdot 10^{-3}$ м), а также соосности кристаллизатора и верхнего сегмента. В связи с этим кристаллизатор, механизм его качания и верхний сегмент объединяют в единый блок, который удаляют из МНЛЗ при прорывах металла или в случае необходимости ремонта и регулирования сегмента. Замена блока на резервный не превышает 90 мин. Устранение последствий прорыва, ремонт и регулирование сегмента производятся вне машины, что позволяет более качественно проводить операции. К конструкции опорных роликов нижних сегментов предъявляют особенно жесткие требования для слябовых МНЛЗ, так как они предназначены для отливки заготовок большого сечения с высокими скоростями и при большом числе плавов в серии. В этих условиях ролики подвергаются воздействию высоких механических и термических напряжений, что нужно учитывать при выборе их конструкции и материала.

На криволинейной МНЛЗ, предназначенной для отливки широких слябов, в правильно-тянущей клетки используют водоохлаждаемые ролики (рис. 8.24). Бочка роликов и валков состоит из внутренней трубы и бандажа, между которыми циркулирует охлаждающая вода.

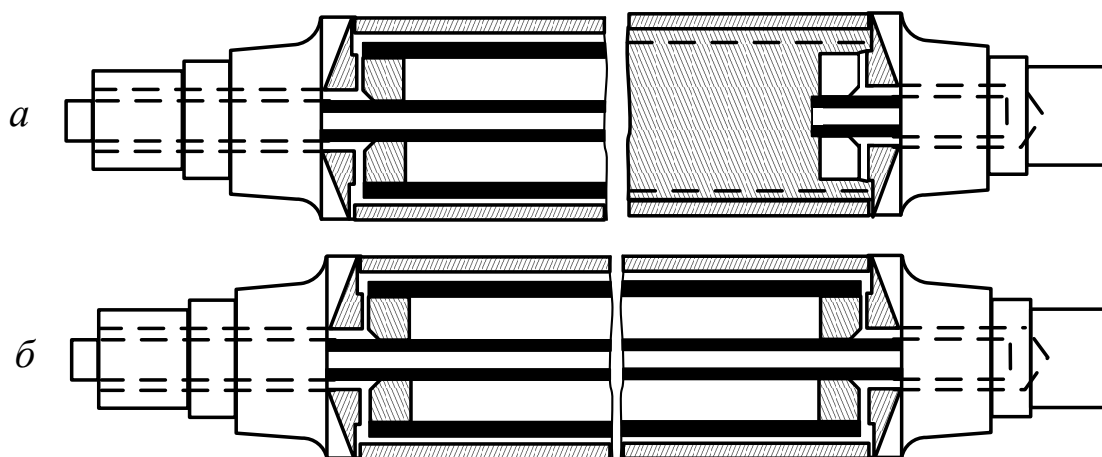
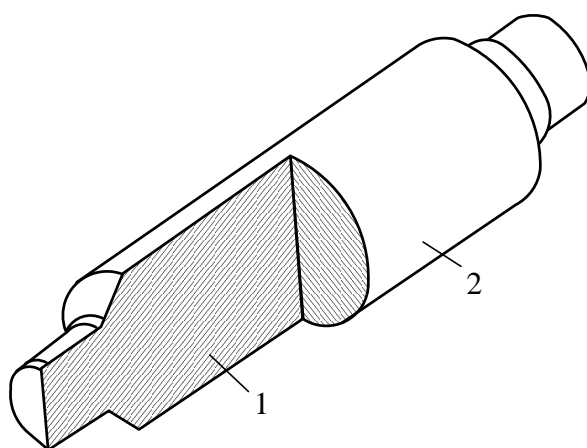


Рис. 8.24. Ролики правильно-тянущей клетки

Каналы для охлаждающей воды вначале выполняли в виде узкого спирального паза (рис. 8.24, а). Недостатком такой конструкции было образование накипи и ржавчины, которые в процессе длительной эксплуатации роликов перекрывали каналы. Применение гладкой внутренней трубы (рис. 8.24, б) позволило устранить эти недостатки в результате увеличения расхода воды. Основным недостатком водоохлаждаемых роликов является низкая стойкость подшипников, так как их уплотне-

ния часто выходят из строя, что, в свою очередь, приводит к утечке воды.

В настоящее время на большинстве МНЛЗ в поддерживающей системе и в тянущей клетки применяют сплошные опорные ролики и валки с внешним форсуночным охлаждением. Сердцевина неприводного опорного ролика (рис. 8.25) состоит из пластичного, вязкого металла; рабочая поверхность выполнена из коррозионностойкой стали, наплавленной на сердцевину. Такие ролики имеют высокую стойкость и низкую стоимость, ремонт их менее трудоемок.



*Рис.8.25. Опорный ролик МНЛЗ:
1 – сердечник ролика; 2 – рабочая поверхность ролика*

Периодический ремонт для удаления трещин и повторная наплавка слоя коррозионностойкой стали обеспечивает роликам повышенную стойкость между ремонтами. Приводные ролики изготавливают из легированной стали с наплавкой коррозионностойкой стали. Твердость поверхности роликов достигает 550 НВ. На слябовых радиальных и криволинейных МНЛЗ сегменты при необходимости ремонта опорных роликов удаляют из машин и заменяют резервными сегментами следующими способами: перемещением сегментов по вертикальным направляющим при помощи крана (рис 8.26); перемещением сегментов в горизонтальном направлении; удалением и заменой сегментов радиального участка специальными манипуляторами (рис. 8.27). На вертикальных МНЛЗ обычных и с изгибом слитка верхние сегменты заменяют при помощи крана в вертикальном направлении.

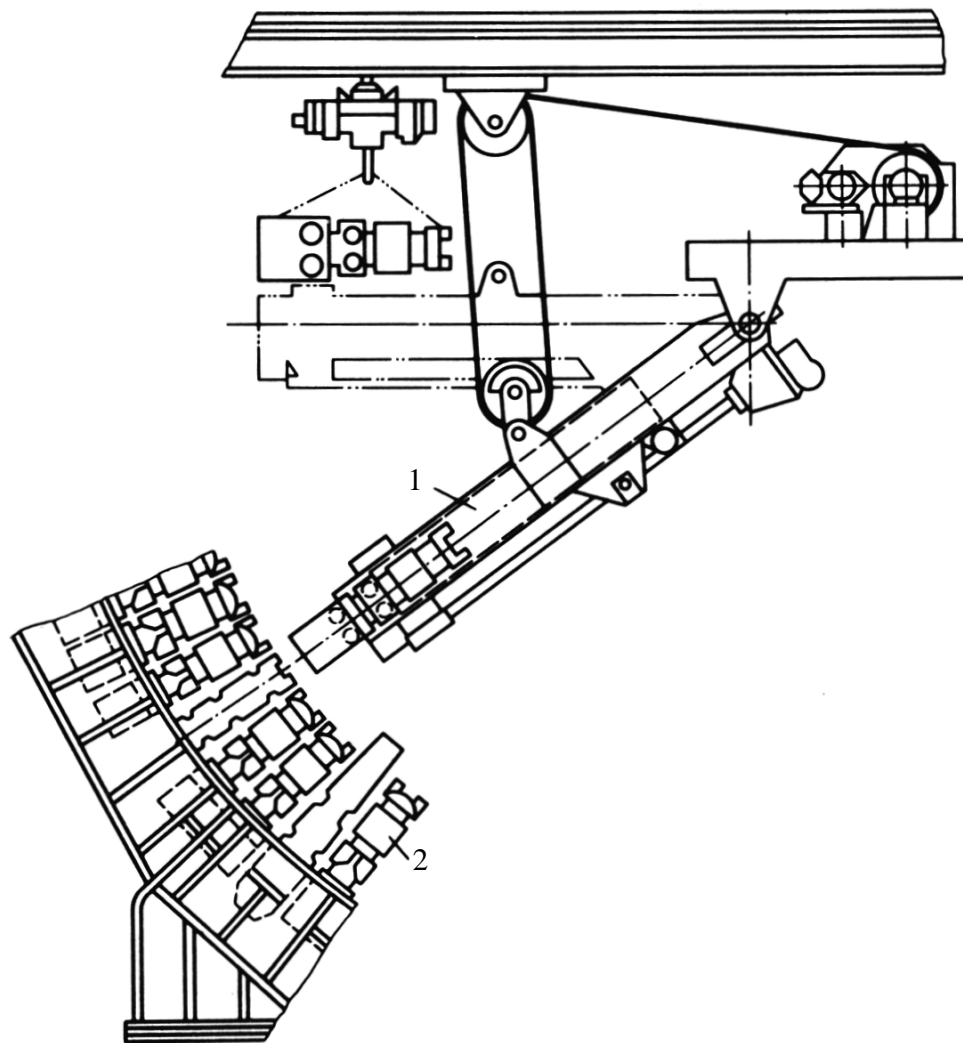


Рис. 8.26. Перемещение сегментов вторичного охлаждения по направляющим: 1 – сегмент; 2 – направляющие

Образование внутренних трещин в непрерывнолитых заготовках обусловлено следующими факторами: значительным расстоянием между парами соседних роликов; биением изогнутых роликов; неточной установкой роликов в сегменте; взаимным смещением сегментов. Проверка этих параметров представляла собой трудоемкую операцию, которая проводилась вручную. Разработаны способы автоматического определения расстояния между опорными роликами вдоль всей поддерживающей системы. Первый способ включает использование мездоз, встроенных в каждый блок опорных роликов, второй – применение специальных «салазок» с датчиками, которые дают возможность определить расстояние между роликами, их деформацию, состояние подшипников.

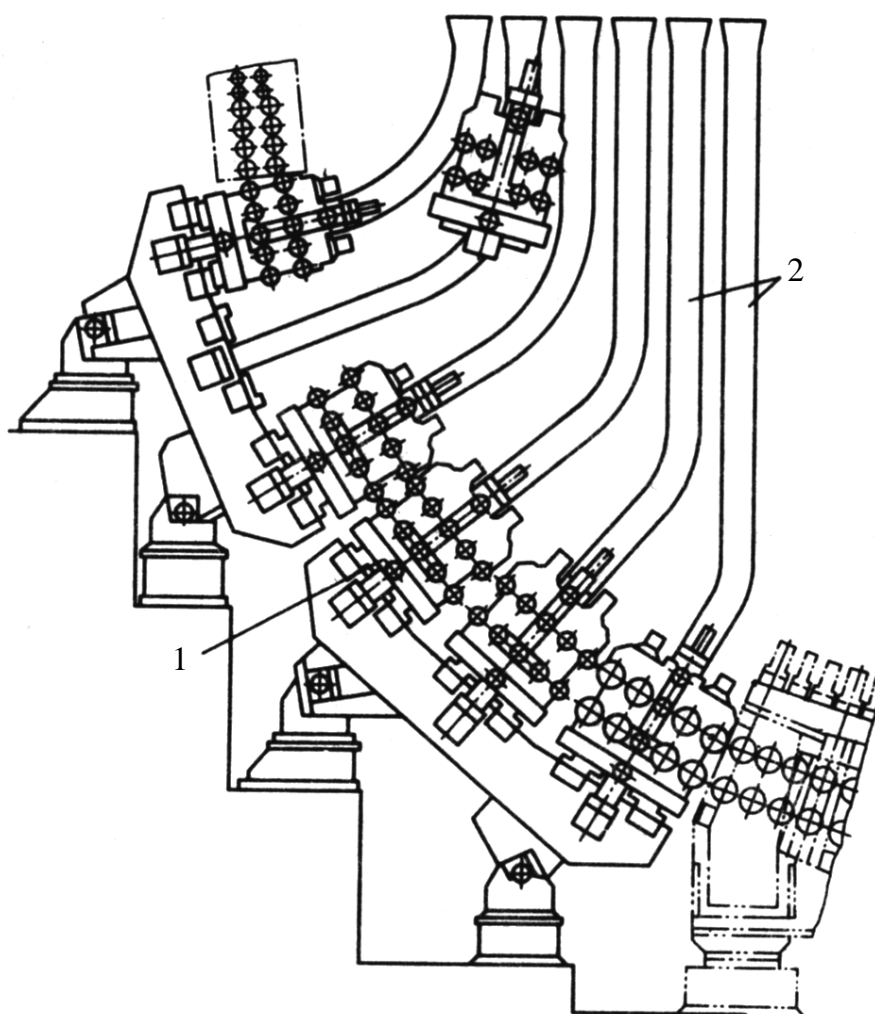


Рис. 8.27. Манипулятор для удаления и замены сегментов вторичного охлаждения: 1 – манипулятор; 2 – сегмент

Месдозы смонтированы в рамках блоков опорных роликов с двух противоположных сторон. Это дает возможность контролировать в процессе разливки нагрузку на каждый блок и сравнивать эти показания со стандартными, при которых осуществляется нормальное поддержание оболочки слитка. По различию этих показателей можно определить отклонение положения роликов от номинального размера и произвести их соответствующую установку в период между разливками.

Салазки (рис. 8.28) крепят к затравке. Внутри салазок находятся датчик с нагруженной пружиной, маятниковый динамометр и пневматический цилиндр. При помощи датчика производят замеры в двух направлениях на каждой паре роликов. Точность определения расстояния между роликами составляет $0,05 \cdot 10^{-3}$ м.

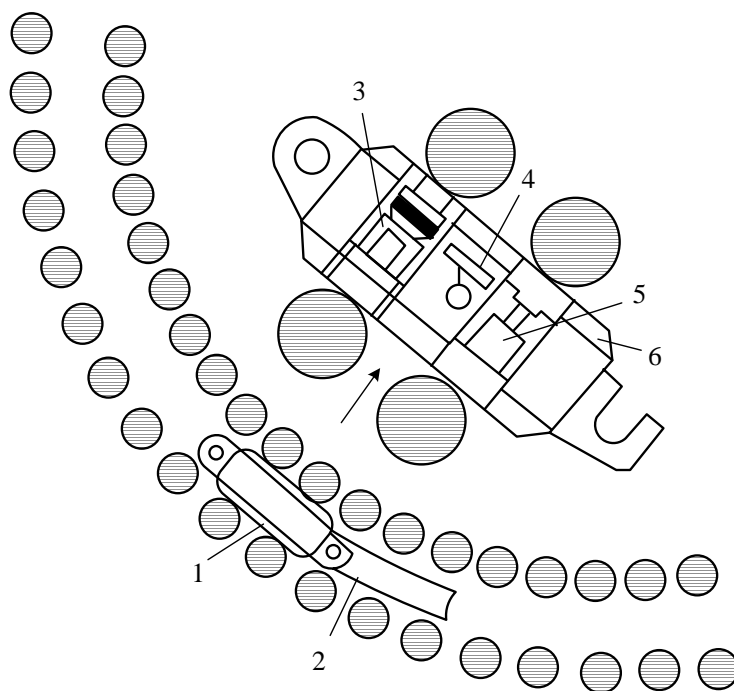
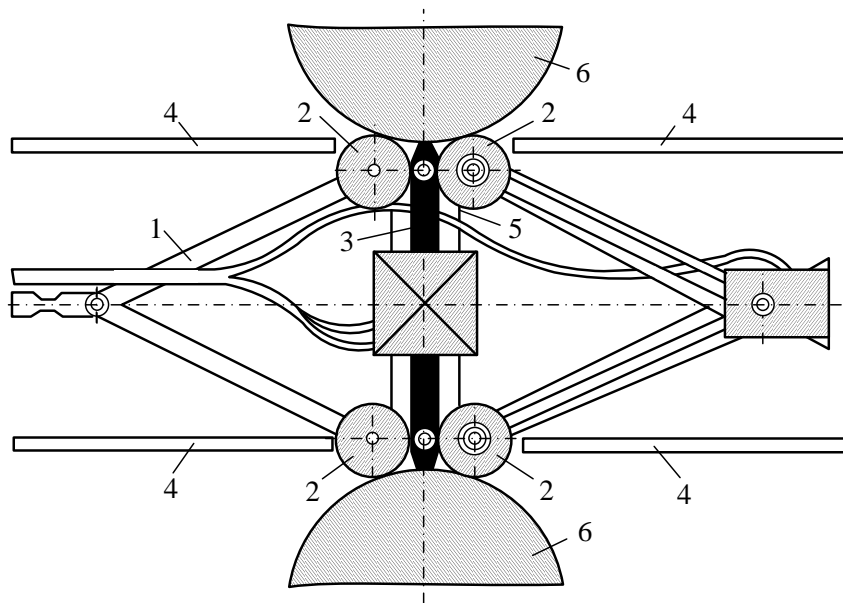


Рис. 8.28. Устройство для контроля положения роликов: 1 – салазки; 2 – затравка; 3 – пружинный датчик; 4 – маятниковый динамометр; 5 – воздушный цилиндр; 6 – направляющие

Эти устройства не дают возможности оценить эксцентриситет роликов, а, следовательно, степень возможной деформации слитка. Более точно оценить состояние поддерживающей системы позволяет измерение расстояния между роликами, их эксцентриситет и сопротивление вращению при помощи устройства (рис. 8.29). Устройство состоит из шарнирной системы двух пар роликов, щупов с датчиками, приводных конвейерных лент и пневматических цилиндров, воздействующих на шарнирную систему. Устройство вводят последовательно в каждую пару опорных роликов, которые затем приводят во вращение роликами устройства, что позволяет определить расстояние между опорными роликами и их эксцентриситет. Опорные элементы поддерживающей системы сортовых МНЛЗ выполняют в виде роликов. Часто используются ролики, расположенные по диагонали слитка, что позволяет снизить его ромбичность.



*Рис.8.29. Устройство для контроля и положения и состояния роликов:
 1 – шарнирная система; 2 – ролик устройства; 3 – чаш; 4 – лента;
 5 – пневматический цилиндр; 6 – опорный ролик*

Каркас слитка квадратного сечения в процессе формирования быстро приобретает жесткость, достаточную для того, чтобы противостоять ферростатическому давлению. В связи с этим на МНЛЗ для отливки квадратных заготовок опорную систему целесообразно устанавливать только в верхней части слитка. Квадратные заготовки малого сечения не требуют опорных устройств, кроме одного ряда направляющих роликов, связанных с кристаллизатором. Ниже кристаллизатора слиток подвергается дальнейшему охлаждению хладагентами при помощи форсунок.

8.5. Тянущие, изгибающие и правящие клетки

Равномерность вытягивания слитка является необходимым условием стабильности технологического процесса разлива. Прочность корочки затвердевающего слитка, выходящего из кристаллизатора, незначительна, и поэтому для предупреждения ее выпучивания и разрыва за кристаллизатором устанавливают неприводную роликтовую проводку, снабженную продольными и поперечными роликами против четырех граней слитка. К неприводной роликтовой проводке, часто называемой первой неприводной роликтовой секцией, предъявляют определенные требования. Должны обеспечиваться простота конструкции, высокая точность установки и возможность ее регулирования, возможность быстрой замены.

Изложенным требованиям удовлетворяет неприводная роликовая проводка (рис. 8.30). Корпус 1 проводки выполнен разъемным из четырех фигурных стенок сварной конструкции и опирается лапами 14 и 18 на несущую раму. Регулирование положения корпуса по оси машины производят болтами 16 и пружинно-винтовым устройством 5 с конической пружинной 6 и регулировочным винтом 7. После выверки корпус закрепляют на раме клиньями 15 и 17. Помимо такого способа крепления, часто используют шарнирное соединение корпуса с двумя опорами, которые для регулировки имеют возможность отдельного перемещения в горизонтальном направлении. В верхней части корпуса по каждой широкой грани сляба установлены в два ряда десять продольных роликов 11 малого диаметра и в нижней части четыре ролика 2 большого диаметра. Ролики малого диаметра, как правило, выполняют ребристыми. Опоры осей роликов соединяют болтами с планками 8, которые связывают с продольными стенками корпуса посредством штанг 9 с клиновыми замками 10. Такая конструкция обеспечивает быструю замену комплексов двух роликов. Опоры осей роликов большого диаметра прикрепляют к стенкам на закладных шпонках болтами. Поперечные ролики 13 установлены против узких граней слитка в верхней части корпуса в двух кассетах 12 по пять роликов в каждой. В нижней части корпуса вместо роликов могут быть применены башмаки 3. Кассеты роликов и башмаки соединены со штангами прямоугольного сечения, входящими в роликовые направляющие 20. Перемещение штанг, а вместе с ними роликов и башмаков производят при переходе с одной ширины отливаемого сляба на другую гидроцилиндрами 19, шарнирно соединенными с корпусом. Связь штока гидроцилиндра с кассетой осуществляется через сферическую опору 21.

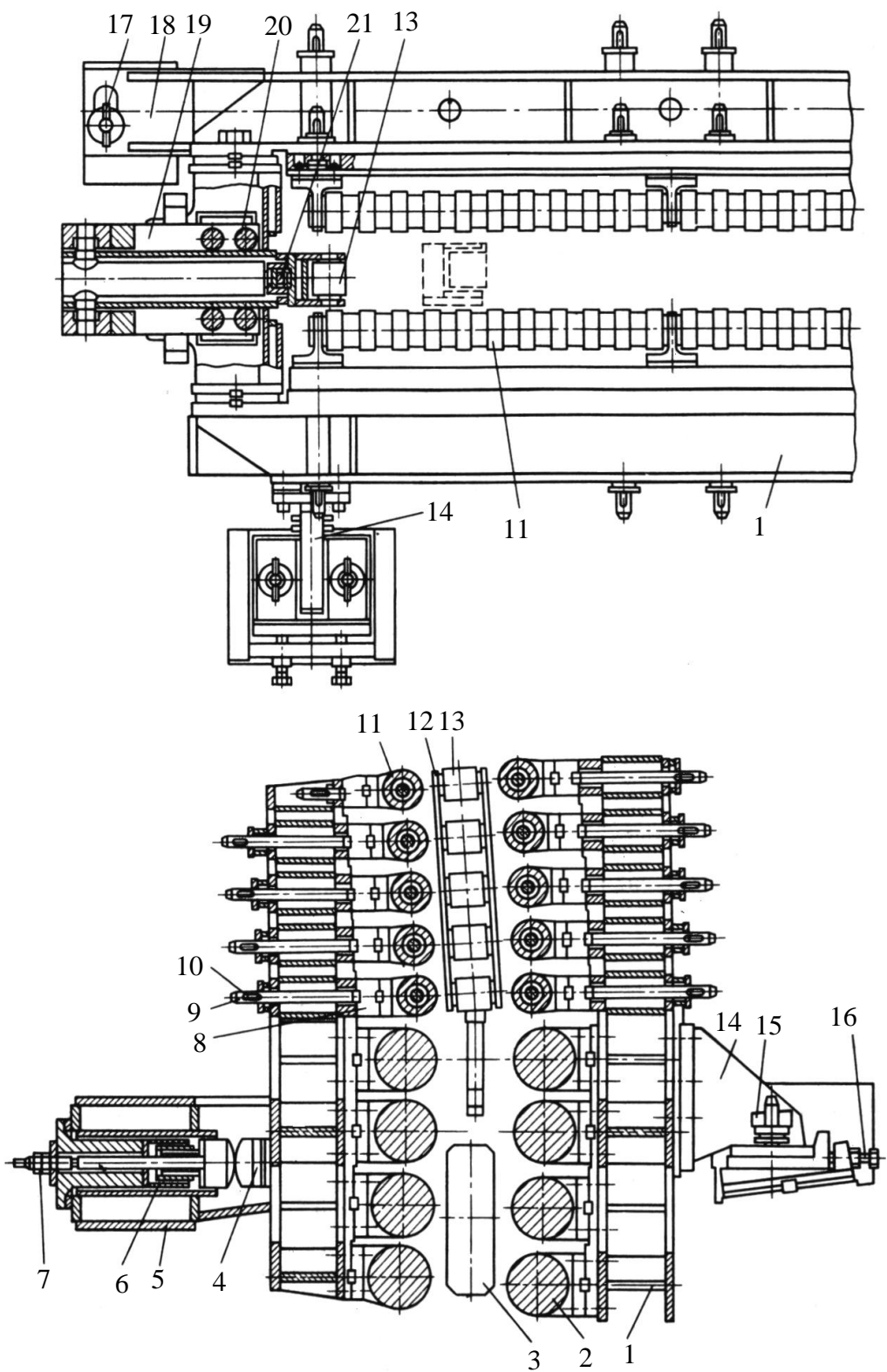


Рис. 8.30. Неприводная роликовая проводка

При переходе с одной толщины отливаемого сляба на другую в диапазоне 0,20 – 0,30 м производят замену промежуточных пластин, устанавливаемых между продольными и поперечными стенками. Помимо этого, изменяют длину наконечника 4 пружинно-винтового устройства.

Для ускорения монтажных и демонтажных работ кристаллизатор и неприводная роликовая проводка объединены в один общий узел.

Приводная роликовая проводка предназначена для предупреждения выпучивания корочки слитка ниже неприводной проводки, перемещения слитка вдоль технологической оси машины и его выпрямления (правки). Приводная роликовая проводка может состоять из двух-трех типоразмеров роликовых секций (сегментов) и правильно-тянущей машины из одних секций трех-четырех видов. К приводной проводке предъявляют определенные требования, вытекающие из условий работы машин: вытягивание слитка должно осуществляться с возможно наименьшими усилиями со стороны роликов на корку; перегрузки роликов при вытягивании и разгибе захлажденного слитка и пропуске наплывов на его поверхности должны быть сведены к минимуму; конструкция проводки должна обеспечивать уборку остывшего слитка кусками более 3 м в случае аварии и замену секции в кратчайшее время, которое на лучших МНЛЗ не превышает 35 мин. В зависимости от типа механизма перемещения и прижатия верхних роликов различают секции с гидравлическими и пружинно-винтовыми механизмами. На рисунке 8.31 показана десятироликовая секция с гидравлическими механизмами перемещения верхних роликов, применяемая на верхнем участке приводной роликовой проводки МНЛЗ. Секция состоит из фигурной сварной станины 3, в которой установлены пять неприводных роликов 4, подвижной рамы 8 с четырьмя неприводными роликами 6, четырех цилиндров 5 перемещения рамы, приводного ролика 7 и двух гидроцилиндров 9 его перемещения. Приводной ролик получает вращение от электродвигателя через планетарный редуктор и шпиндель. Станину устанавливают на основание (опорные) балки 1 и закрепляют клиновыми соединениями 2. Подвижная рама помещена в направляющие 15 станины и связана сферическими шарнирами 13 с гидроцилиндрами перемещения. Последние, в свою очередь, шарнирно закрашены в станине. На раме установлены гидроцилиндры перемещения приводного ролика, соединенные с подушками 11 подшипников. Такая конструкция обеспечивает перемещение рамы со всеми верхними роликами и отдельное перемещение приводного ролика.

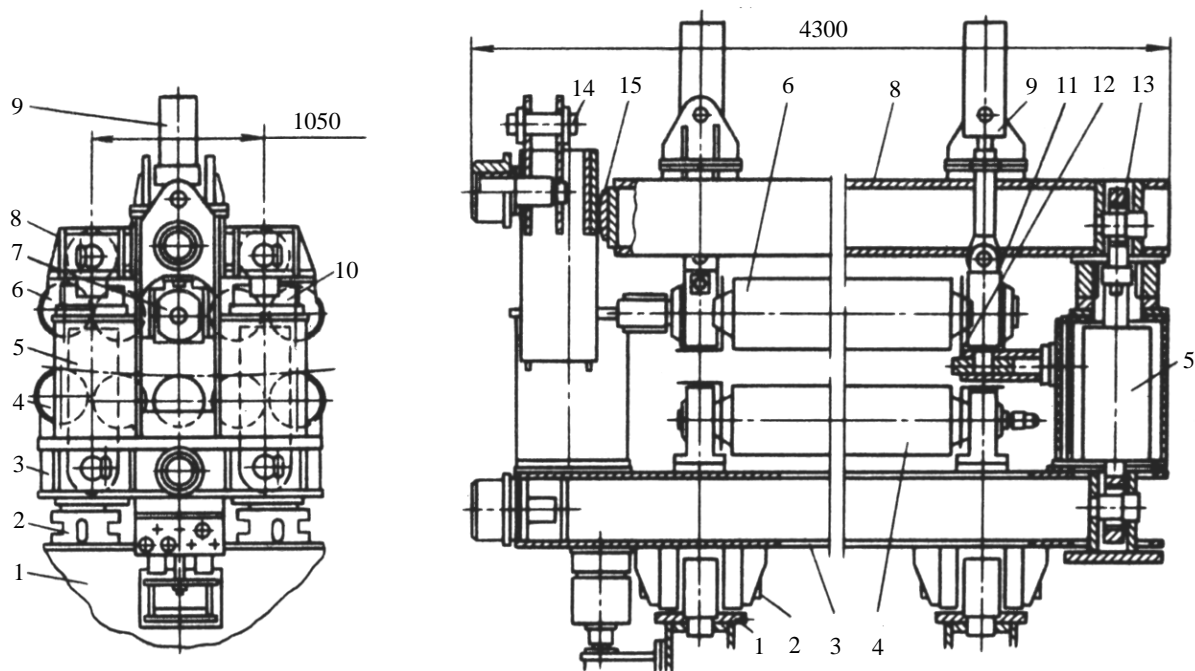


Рис.8.31. Десятироликовая секция с гидравлическими механизмами перемещения и прижима роликов

Гидроцилиндры перемещения рамы выполняют несколько функций: в рабочем положении прижимают подвижную раму к стойкам станины, в результате чего ролики испытывают нагрузку только от ферростатического давления внутри слитка; при аварийной ситуации и настройке машины производят быстрый подъем роликов в крайнее верхнее положение; ограничивают нагрузки на ролики при вытягивании застуженного слитка. Приводной ролик перемещается вниз при вводе заправки в машину, которая имеет меньшую длину, чем слиток. Регулировку секции при переходе с одной толщины на другую осуществляют заменой фигурных прокладок 10. Опорные узлы 11 роликов имеют двухрядные конические роликовые подшипники. Для предупреждения попадания окалины и воды внутрь подшипника применены сальниковые уплотнения и установлены отбойные щитки 12. Для захвата мостовым краном станины секции предусмотрена проушина с закладными пальцами 14.

Правильно-тянущая машина, входящая в состав приводной роликовой проводки МНЛЗ, приведена на рисунке 8.32. Машина состоит из трех отдельных роликовых секций, примыкающих друг к другу и установленных на фундаментные балки 8.

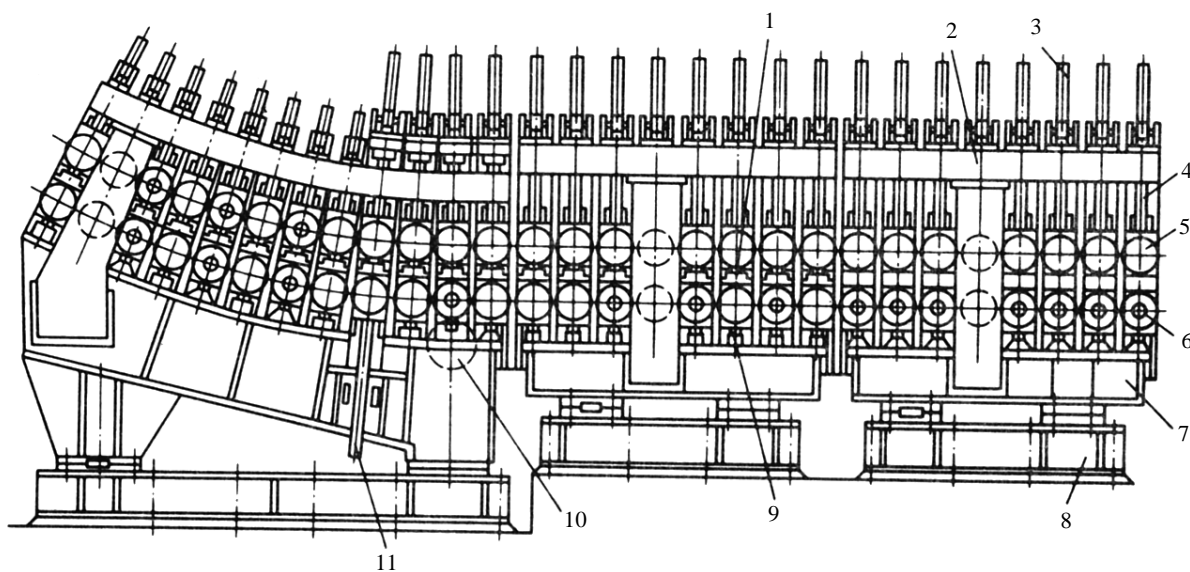


Рис. 8.32. Правильно-тянущая машина с гидравлическими механизмами перемещения и прижима роликов

Первая секция по ходу слитка предназначена для его правки, вторая и третья секции – для создания тянущего усилия и выдачи слитка на приемный рольганг. В каждой секции установлены два ряда роликов: верхних 5 и нижних 6. Ролики верхнего ряда, за исключением трех в первой секции, неприводные. В первой и второй секциях нижние приводные ролики чередуются через один-три с неприводными. В третьей секции все нижние ролики приводные, что диктуется необходимостью получения значительного тянущего усилия для перемещения и выдачи затвердевшего слитка на рольганг. Поскольку нижний ролик, расположенный в месте перехода радиальной части в криволинейную, при правке слитка подвержен действию максимальной нагрузки, предусмотрена установка опорного ролика 10 большего диаметра, прижимаемого двумя гидроцилиндрами к рабочему ролику. Для предохранения от поломки нижних роликов первой и второй секций при возможных перегрузках в их опорных узлах установлены короткоходовые гидроцилиндры 9. Для лучшего манипулирования при выдаче порезанных кусков слитка в аварийной ситуации один из нижних роликов на переходном участке выполнен подвижным. Его вертикальное перемещение осуществляется двумя гидроцилиндрами 11. Подушки подшипников верхних и нижних роликов помещены между стойками станины 7. Каждый верхний ролик перемещается по нормали к технологической оси и прижимается к слитку двумя гидроцилиндрами 3, штоки 4 которых шарнирно соединены с по-

душками подшипников. Расстояние между роликами в первых двух секциях регулируют сменными прокладками 1. Стойки станины в верхней части связаны продольными балками 2, расположенными с обеих сторон. Конструкция станины обеспечивает быструю замену рабочих роликов поузловым методом. Приводы секций роликовой проводки и правильно-тянущей машины унифицированы.

Скорость вытягивания слитка регулируется в диапазоне $(0-5,0) \times 10^{-2}$ м/с изменением частоты вращения электродвигателя. Ввод заправки в машину осуществляется на скорости до $7,5 \cdot 10^{-2}$ м/с. Недостатки проводки: большое число гидроцилиндров; конструкция секций требует применения для подвода масла к гидроцилиндрам шлангов высокого давления; недостаточная унификация узлов проводки; применение роликовых секций и правильно-тянущей машины; большая перегрузка роликов при выдаче захоложенного слитка.

Для унификации узлов, повышения технологичности и снижения стоимости изготовления, улучшения условий монтажа, ремонта и обслуживания приводная роликовая прорodka выполнена из отдельных четырех роликовых секций одностипной конструкции, отличающихся диаметром роликов и усилиями гидроцилиндров. На рисунке 8.33 приведена конструкция четырехроликовой секции (клетки) с гидравлическим механизмом перемещения и прижатия верхних роликов. Секция состоит из рамы 8 с опорной плитой 7, двух неприводных верхних роликов 2, нижних приводного 6 и неприводного 5 роликов, траверсы 1, двух балансиров 4 и двух гидроцилиндров 9, закрепленных в гнездах рамы. Подшипниковые опоры нижних роликов установлены на плите 7, опоры верхних роликов прикреплены к подвижной траверсе. Последняя соединена балансиром со штоками гидравлических цилиндров. Применение балансиров с двумя взаимно перпендикулярными цилиндрическими шарнирами, расположенными в плоскости нижних образующих роликов (плоскость X-X), обеспечивает равномерное распределение усилий гидроцилиндров между двумя верхними роликами. С одной стороны соединение траверсы с балансиром выполнено серьгой 3 для исключения дополнительных нагрузок при перекосах подвижной системы, возникающих в случае неравномерного хода штоков гидроцилиндров, благодаря этому отпала необходимость в гидравлической системе синхронизации их работы. При необходимости верхние ролики могут быть подняты в крайнее положение для пропуска остывшего слитка. Горизонтальные нагрузки воспринимают плунжеры гидроцилиндров, помещенные в усиленные кольцевые направляющие. Такая конструкция позволила исключить стойки и уменьшить металлоемкость, улучшить условия проведения ремонта и ликвидировать прорывы металла.

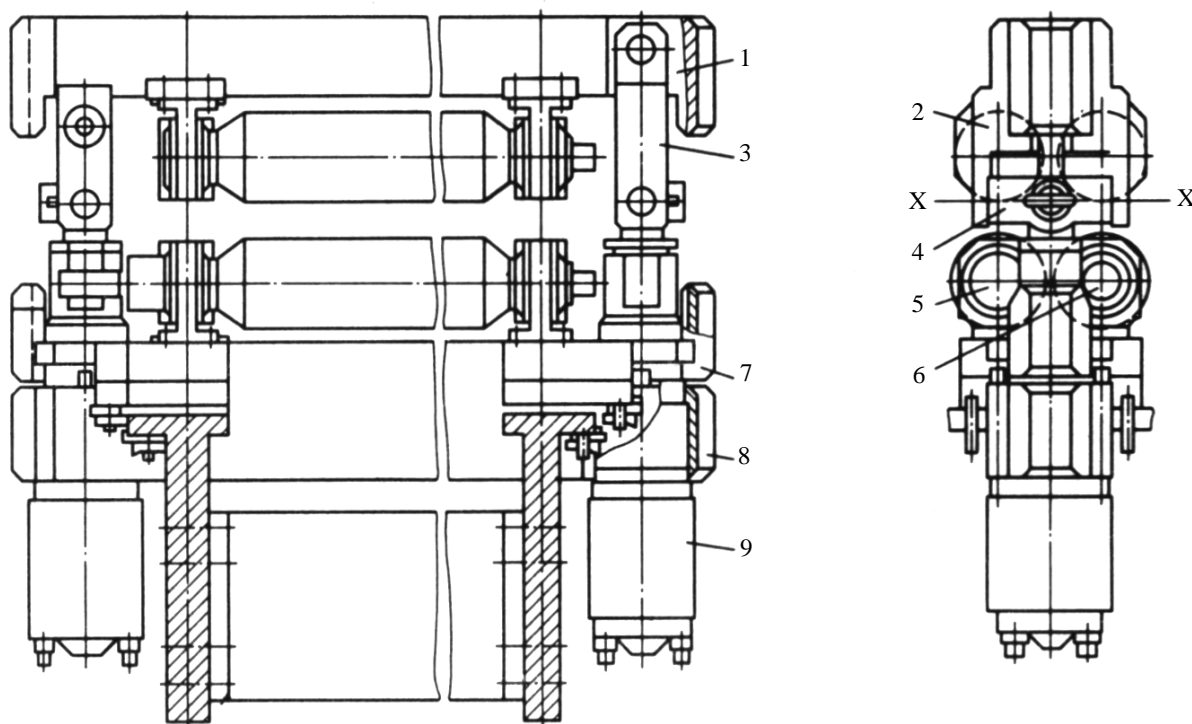


Рис. 8.33. Четырехроlikовая секция с гидравлическим механизмом перемещения и прижима роликoв

Приводные роlikовые проводки радиальных и криволинейных МНЛЗ снабжены роlikовыми секциями с пружинно-винтовыми механизмами перемещения и прижима верхних роликoв. На рисунке 8.34 показана шестироlikовая секция, устанавливаемая на радиальных и криволинейных участках приводных проводок. Секция состоит из литой рамы 10 с установленными на ней тремя нижними роликoми 11, подвижной траверсы 8 с тремя верхними роликoми 12, механизма перемещения верхних роликoв с двумя поступательно движущимися винтами, пружинных устройств с пакетами больших 6 и малых 7 тарельчатых пружин и

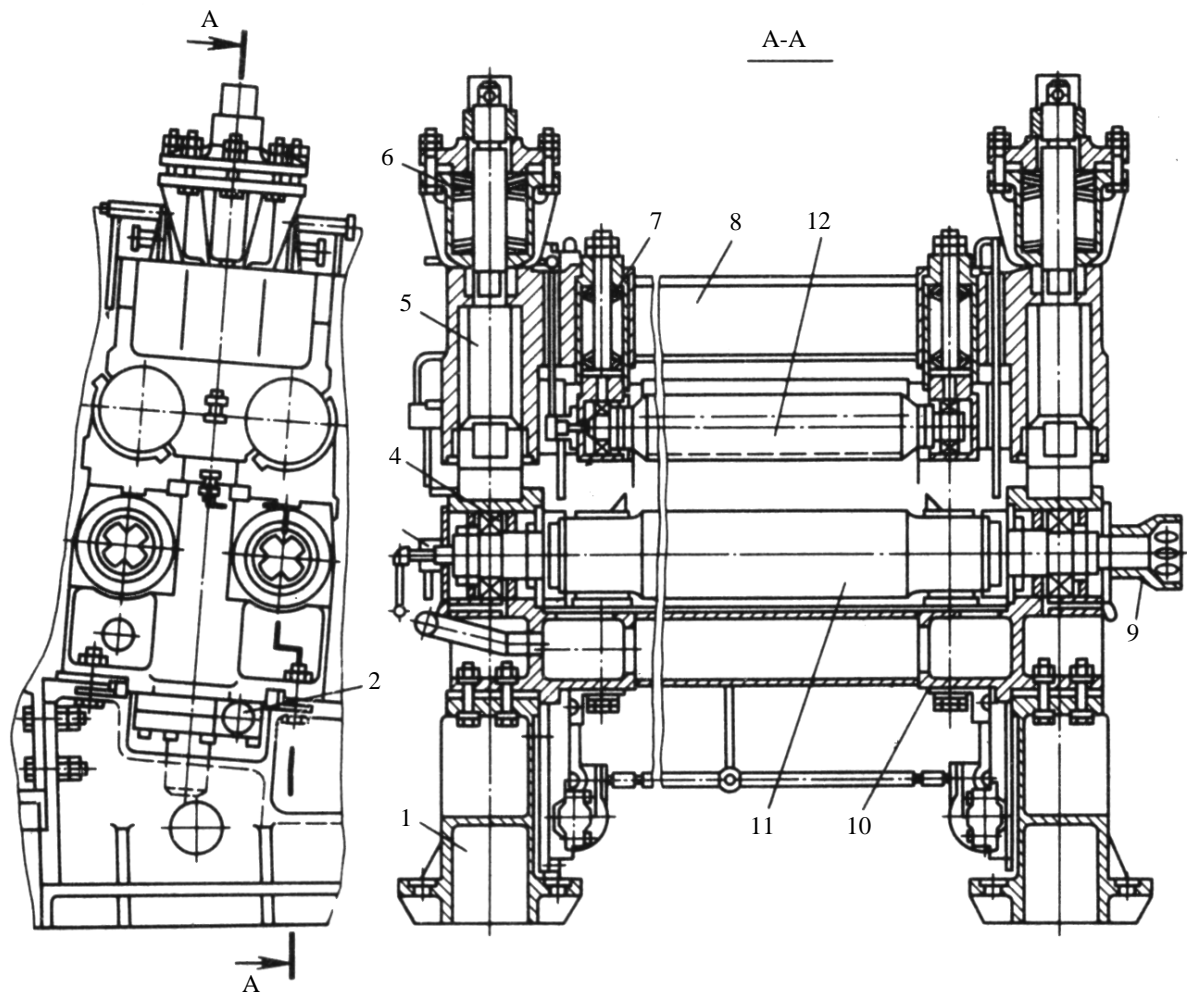


Рис. 8.34. Шестироликовая секция с прижимно-винтовым механизмом перемещения и прижима роликов

двух приводов нижних роликов. Рама установлена на литые фундаментные балки 1. Ролики верхнего ряда – неприводные; в нижнем ряду крайние ролики вращаются от индивидуальных приводов. Средние ролики верхнего и нижнего рядов выполнены меньшего диаметра, чем крайние. Траверса свободно опирается на хвостовики 5 двухходовых винтов червячно-винтовых редукторов. Между траверсой и гайками на хвостовиках установлены пакеты больших тарельчатых пружин, заключенных в обоймы. Усилия предварительного сжатия пружин регулируются болтами, расположенными по окружности обоймы. Траверса смещается по хвостовикам, предохраняя ролики от поломки, когда усилие на крайние ролики превысит силу предварительного сжатия пружин. Аналогичным образом настраивают тарельчатые пружины среднего верхнего ролика. Механизм подъема верхних роликов состоит из элек-

тродвигателя, планетарного редуктора, промежуточного вала с зубчатыми муфтами и двух червячно-винтовых редукторов 2, вмонтированных в опорную раму. Быстроходные валы редукторов связаны между собой промежуточным валом, который обеспечивает синхронное движение ходовых винтов. Величина хода обеспечивает требуемое разведение роликов при пропуске остывшего слитка. Горизонтальные усилия воспринимаются хвостовиками винтов, помещенными в направляющие втулки опорной рамы. Опоры роликов снабжены двухрядными сферическими роликоподшипниками 4. Все ролики секции водоохлаждаемые. В теле роликов с неприводной стороны выполнено центральное глухое отверстие, в которое введена трубка. По центральному и образовавшемуся кольцевому каналам осуществляется подвод и отвод воды через водораспределитель 3 с сальниковыми уплотнителями. Последний связан с напорными и сливными трубопроводами. Каждый из двух приводных роликов получает вращение от электродвигателя постоянного тока через планетарный редуктор и промежуточный вал с зубчатой и ролико-сферической 9 муфтами. Достоинством проводки является большое число приводных роликов, что резко уменьшает напряжения в корке, слитка. Недостатки заключаются в трудности настройки пружинных устройств на задаваемые усилия и меньшей надежности их работы по сравнению с гидроцилиндрами. Опыт применения механизмов с пружинным прижатием роликов на ряде зарубежных МНЛЗ не дал положительных результатов.

Глава 9. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

9.1. Особенности формирования непрерывного слитка

Теплопередача в кристаллизаторе, линейная скорость разливки, равномерность роста корочки слитка и распределение напряжений в ней во многом зависят от контакта слитка с рабочими стенками и, в свою очередь, определяют ее. Кроме того, практические предложения об улучшении условий службы и конструкции кристаллизатора во многом основываются на представлении о контакте слитка со стенками. От контакта зависит величина усилия трения, которая определяет конструктивные параметры механизмов возвратно-поступательного движения кристаллизатора и тянущей клетки МНЛЗ. Правильный выбор этих параметров обеспечивает нормальный режим работы МНЛЗ.

Представим, что зеркало металла в кристаллизаторе практически не меняет своего положения, в этом случае на участках контакта жидкого металла и плотного прилегания корочки к стенкам кристаллизатора температура стенок на поверхности соприкосновения будет близкой к температуре затвердевания стали. Следовательно, контактная поверхность медной стенки в верхней зоне должна была бы оплавляться или быть очень горячей. В действительности, средняя температура рабочей поверхности кристаллизатора даже вблизи зеркала металла равна 373 – 393 К. Температура стенки кристаллизатора в $2 \cdot 10^{-3}$ м от поверхности, обращенной к металлу, повышается только время от времени на короткий срок менее 473 К. Коэффициент теплопередачи в кристаллизаторе даже возле зеркала металла невелик ($1,5 - 20$ кВт/м²·К) по сравнению с коэффициентом теплопередачи от расплавленного свинца к стали, равным $3,5$ кВт/м²·К или при штамповке стали ($5,83 - 8,15$ кВт/м²·К). Можно объяснить этот факт образованием тонкой корочки, поверхность которой, обращенная к кристаллизатору, не гладкая, а слегка волнистая. В предполагаемой зоне зазора замеренная теплопередача в несколько раз выше, чем рассчитанная на основании допущения о том, что теплообмен обуславливается только излучением. Затвердевание металла в кристаллизаторе и сопутствующие ему процессы можно наиболее полно описать на основе представлений о частичном контакте слитка со стенками, исходя из которых участки поверхности слитка отделены от стенок кристаллизатора зазорами.

Жидкая сталь внутри полости кристаллизатора должна была бы

принять при затвердевании его размеры, если бы не усадка металла и не коробление корочки слитка термическими напряжениями. Образованию зазоров под действием усадки и коробления противодействует ферростатическое давление, которое изгибает и растягивает корочку слитка. В процессе разливки величина зазора между стенкой кристаллизатора и корочкой слитка равна:

$$\delta = \omega^p + \omega^t + \Delta_y + \Delta_p + \omega_k^t, \quad (9.1)$$

где ω^p – изгиб корочки слитка под действием ферростатического давления, м;

ω^t – изгиб корочки слитка под действием термических напряжений, м;

Δ_y – усадка корочки слитка, м;

Δ_p – растяжение корочки слитка под действием ферростатического давления, м;

ω_k^t – коробление стенок кристаллизатора, м.

Каждое из слагаемых уравнения (9.1) должно быть со своим знаком в выбранной системе координат. Трудности в решении этого уравнения вынуждают заменять дискретные условия на поверхности контакта непрерывными.

Удобно пользоваться понятием о кажущемся сплошном воздушном зазоре между стенкой кристаллизатора и слитком, при котором теплопередача в кристаллизаторе, а, следовательно, затвердевание металла протекают аналогично тому, что имеет место в действительности.

Толщина кажущегося зазора определяется формулой:

$$\Delta_{з.к} = \lambda_b (T_n - T_c) / (g_1 - g_2), \quad (9.2)$$

где λ_b – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/м·К;

T_n – температура поверхности слитка, К;

T_c – температура поверхности стенки кристаллизатора, обращенной к металлу, К;

g_1 – плотность теплового потока, направленного от слитка к стенке кристаллизатора, Вт/м²;

g_2 – плотность теплового потока излучения, Вт/м².

При физико-математическом рассмотрении принимают следующие допущения. Отсутствует тепловой барьер тепловому потоку на поверхности между корочкой и кристаллизатором. Охлаждение водой кристаллизатора достаточное, чтобы поддерживать температуру его внутренних стенок равномерной. Можно получить зависимость между толщиной корочки и продолжительностью ее образования:

$$\delta_k = 0,335(\sqrt{1 - 0,95\tau} - 1). \quad (9.3)$$

При постоянстве разности между температурой ликвидуса и температурой поверхности корочки имеем:

$$\delta_k = 0,28 \sqrt{\tau} . \quad (9.4)$$

Затвердевание крупных слитков полностью завершается в течение времени, рассчитанного по формуле (6.3). Эмпирическое определение толщины корочки и глубины лунки жидкой фазы осуществляют автораддиографией с растворением изотопов ^{32}P или ^{33}S . Наиболее простым и точным способом изучения законов кристаллизации непрерывного слитка следует считать выливание жидкой фазы путем прожигания корочки газокислородной горелкой. Обмер внутреннего профиля или взвешивание оставшегося «чулка» дают возможность определить глубину лунки, а также местную или среднюю толщину корочки при любой глубине лунки. Поскольку вытекание жидкой сердцевины продолжается менее 10 с, погрешность результатов определения остается в пределах $\pm 1\%$. Так, Чипман и Фандерсмит определили, что:

$$\delta_k = -0,12 + 0,9 \sqrt{\tau} . \quad (9.5)$$

По Нельсону продолжительность полного затвердевания слитка

$$\tau = 0,33 \cdot 10^3 D^2, \quad (9.6)$$

а по другим данным

$$\tau = \left(\frac{D + 52 \cdot 10^{-3}}{74,5 \cdot 10^{-3}} \right)^2 ; \tau = \left(\frac{D + 46 \cdot 10^{-3}}{66 \cdot 10^{-3}} \right)^2, \quad (9.7)$$

где D – сторона квадрата или диаметр круга, м.

Технологические факторы существенно влияют на скорость затвердевания непрерывного слитка. Наиболее сильное влияние оказывают температура (перегрев над ликвидусом) разливаемой стали, скорость вытягивания и конфигурация сечения слитка. Это влияние обнаруживается по изменению коэффициента затвердевания в формуле (9.4).

9.2. Теплофизические условия затвердевания слитка в кристаллизаторе

При известном значении термического сопротивления в кристаллизаторе можно рассчитать толщину затвердевающей в нем корочки слитка (рис. 9.1). Полученное графическое изображение в ряде случаев необходимо дополнить аналитическими зависимостями, описывающими затвердевание металла в кристаллизаторе.

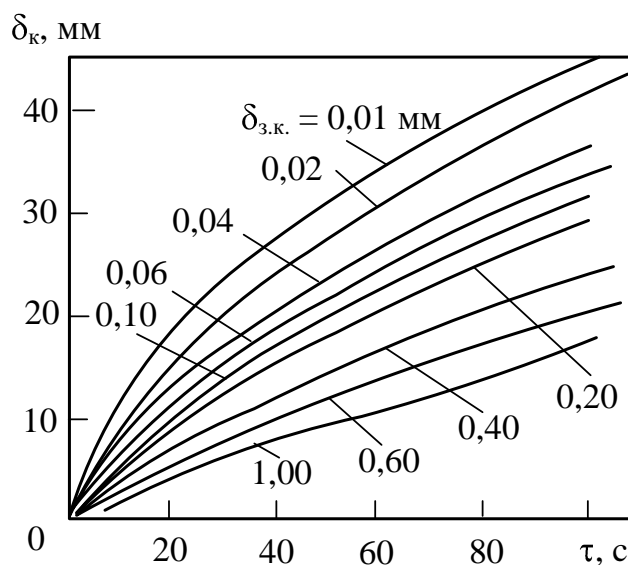


Рис. 9.1. Рост корочки слитка в кристаллизаторе при различной толщине кажущегося зазора

Для того чтобы получить формулы, отражающие затвердевание в первые секунды формирования слитка, допустим, что на уровнях, близких к зеркалу металла, тепловые потоки, направленные от слитка к кристаллизатору, образуются только за счет отвода внутренней теплоты затвердевания. Ошибка этого допущения зависит от того, какую величину составляют по отношению к тепловому потоку затвердевания тепловые потоки перегрева и аккумуляции.

Влияние тепловых потоков, возникающих при охлаждении перегретой жидкой сети, может быть существенным, если перегрев больше 10 град. и коэффициент теплоотдачи больше 5 кВт/м². В сложившейся практике разливки стремятся свести перегрев до минимума (рекомендуется перегрев 10 – 15 град.), а также подавать сталь под уровень в кристаллизатор. Последнее требование обеспечивает наибольшие коэффициенты теплоотдачи от жидкой стали к затвердевающему слою на горизонтах, близких к зеркалу металла. В связи с этим в первом приближении можно не учитывать тепловые потоки перегрева.

Второй фактор, влияющий на ошибку принятого допущения, зависит от снижения температуры затвердевшего слоя. При уменьшении средней температуры слоя в два раза ошибка вычисления (или неучтенное за рассматриваемый промежуток времени относительное количество тепла аккумуляции) будет равна:

$$\epsilon \epsilon = C\Delta T / 2Q. \quad (9.8)$$

При снижении температуры поверхности на каждые 100 К ошибка

вычисления возрастает на 12,3 %. Для определения динамики роста корочки в первые секунды будем приближенно считать, что здесь тепловой поток постоянен. Судя по экспериментальным данным, его значение равно $1,9 - 3,0 \text{ мВт/м}^2$, тогда толщина корочки:

$$\delta_k = A\tau\delta_k = A\tau, \quad (9.9)$$

т.е. рост корочки слитка пропорционален времени затвердевания; A – коэффициент пропорциональности, равный $1,0 - 1,6 \text{ мм/с}$. Зависимость (6.9) принята для описания динамики роста корочки слитка вблизи зеркала металла.

Спустя $2 - 3 \text{ с}$ от начала затвердевания температура поверхности непрерывного слитка снизится на 200 град. , т.е. приблизительно до 1573 К . При этом ошибка в определении по формуле (9.9) толщины корочки слитка составит примерно 25% , следовательно, можно применять формулу (9.9) только в первые $2 - 3 \text{ с}$ затвердевания.

Описывая изменение толщины корочки слитка в более позднее время затвердевания, воспользуемся данными экспериментального изучения динамики роста корочки слитка в кристаллизаторе.

Для определения фронта затвердевания стального слитка применяют в основном метод ввода в жидкую сердцевину серы или сернистого железа, хотя этот метод имеет недостаток: нельзя определить ширину двухфазной области. Однако при непрерывной разливке, вследствие большой скорости охлаждения, в поверхностном слое слитка углеродистой стали твердожидкое состояние создается в очень малой степени и не может оказывать существенного влияния на прочность поверхностного слоя при температурах, близких к точке затвердевания. Затвердевание металла в кристаллизаторе обычно описывают, пользуясь решением Стефана задачи о промерзании грунта. Согласно этому решению, время затвердевания и толщина застывшего слоя связаны параболической зависимостью (законом квадратного корня):

$$\delta = K\sqrt{\tau}. \quad (9.10)$$

Уравнение (9.10) описывает движение фронта затвердевания достаточно просто для решения многих теоретических и практических вопросов с допустимой точностью, поэтому зависимость толщины затвердевшей корочки от времени часто называют законом квадратного корня.

Иногда этому уравнению придают такую форму $\delta = K\sqrt{\tau} + \text{const}$.

Значение коэффициента K в формуле (9.10) многие исследователи принимают постоянным в течение всего процесса затвердевания. Исключение делают для последнего периода, когда скорость затвердева-

ния несколько повышается (вследствие охлаждающего действия застывшей части слитка) и поэтому константа затвердевания остающейся небольшой массы жидкого металла увеличивается.

Приближенно динамику роста корочки слитка в кристаллизаторе, спустя 3 – 10 с от начала затвердевания, можно описать законом квадратного корня при постоянном значении коэффициента K , который в зависимости от конкретных условий может быть принят в пределах 3,09 – 3,74 мм/с^{0,5}. При этом заметные отклонения наблюдаются только в начальный период затвердевания, когда фактическая толщина корочки меньше рассчитанной. Это можно объяснить тем, что температура поверхности слитка в первое время затвердевания изменяется не мгновенно, как это предполагается законом квадратного корня, а с определенной скоростью, а также действием на формирующуюся корочку тепла перегретого жидкого металла. Результаты расчетов лучше согласуются, если учитывать, что коэффициент полного затвердевания не является постоянной величиной, а увеличивается со временем. Это увеличение – следствие снижения температуры поверхности слитка, что особенно заметно в первые секунды.

Значения коэффициентов полного затвердевания на одном и том же уровне различны. Это объясняется тем, что скорость снижения температуры участков поверхности слитка обусловлена условиями контакта корочки слитка со стенками кристаллизатора. Кроме того, на величину определяемого в экспериментах коэффициента в уравнении (9.10) влияют температура и скорость движения потоков жидкого металла на фронте затвердевания. Пределы колебаний средних значений коэффициента полного затвердевания для слитка, находящегося в кристаллизаторе, составляют для верха слитка 2,84 – 3,21; середины – 3,24 – 3,56; низа – 3,78 – 3,88 мм/с^{0,5}.

Наибольшая амплитуда колебаний имеет место в верхней части кристаллизатора, где на затвердевание резко влияет разница в термическом сопротивлении отдельных участков поверхности слитка. Кроме того, в этой же зоне наиболее значительно действие перегрева жидкой стали. С увеличением толщины корочки амплитуда колебаний уменьшается, а абсолютные значения K возрастают.

Усредненные значения коэффициента полного затвердевания составили для широких граней 2,97 – 3,78; для узких 3,30 – 3,34 мм/с^{0,5}. Средние для всех слитков значения коэффициента для широких и узких граней были соответственно равны 3,36 и 3,23 мм/с^{0,5}.

Значение коэффициента полного затвердевания в кристаллизаторе находится в пределах 1,29 – 3,86 мм/с^{0,5}. Для условий разлива в изложницы коэффициент K в начальный период формирования слитка, кото-

рый примерно соответствует времени пребывания металла в кристаллизаторе, имеет несколько меньшее значение $0,865 - 3,35 \text{ мм/с}^{0,5}$.

Такое различие в коэффициентах затвердевания объясняется тем, что непрерывный слиток охлаждается интенсивнее слитка, отливаемого в изложницу. Это подтверждается сопоставлением критериев Био в функции критерия Фурье для слитка, отливаемого в кристаллизатор и в изложницу. Значения критерия Био при непрерывной разливке больше, чем при разливке в изложницы.

Более интенсивное охлаждение непрерывного слитка обусловлено, главным образом, тем, что температура стенок кристаллизатора ниже, чем изложницы ни практически не изменяется во время разливки.

Кроме того, нарастающее давление жидкого металла на корочку слитка должно приводить к более плотному контакту со стенками, чем при разливке стали в изложницы

Для того чтобы закон квадратного корня соблюдался при Отвердевании металла в кристаллизаторе, необходимо выполнение ряда условий: на поверхности слитка в кристаллизаторе сразу устанавливается определенная температура T_n , которая в дальнейшем не изменяется; толщина кристаллизатора равна бесконечности, т.е. намного больше затвердевающего в нем слоя металла; теплопроводность, теплоемкость и плотность металла при одном и том же его агрегатном состоянии не изменяются с изменением температуры; кристаллизатор по форме приближается к бесконечной пластине, т.е. его углы достаточно удалены от рассматриваемой точки, лежащей на поверхности затвердевания; затвердевший слой металла достаточно велик (8 – 38 мм); движение в расплаве, который находится внутри тела слитка, отсутствует; теплопередача идет от жидкого металла к твердому за счет теплопроводности.

Очевидно, что как в изложнице, так и в кристаллизаторе не соблюдается точно ни одно из перечисленных выше условий, поэтому рост корочки слитка не подчиняется, строго говоря, закону квадратного корня. Если динамику роста корочки в кристаллизаторе нужно отразить точно, то следует пользоваться формулами, отличными от закона квадратного корня, где коэффициент полного затвердевания принят постоянным.

Например, продвижение фронта затвердевания во времени можно выразить в виде зависимости

$$\delta = K\tau^m. \quad (9.11)$$

Значения коэффициентов K и m определяют из данных экспериментальных исследований. Однако часто не учитывается тот факт, что на толщину корочки влияют потоки перегрева. В связи с этим результа-

ты определения коэффициентов K , n и m должны быть различными, если меняется степень перегрева металла. Чтобы исключить этот фактор, установили величину коэффициента m в уравнении (9.11) по данным о значении теплового потока, равную 0,5, 0,6 и 0,7, и считали, что перегрев металла отсутствует. Коэффициент K для каждого из рассматриваемых случаев определяли из опытных данных, которые показывают, что через 120 с толщина корки слитка составляет $(35,4-42,5) \cdot 10^{-3}$ м. Следовательно, по формуле (9.10) $K = 3,23 - 3,88 \text{ мм/с}^{0,5}$, по формуле

$$\delta = K\tau^{0,6}, \quad (9.12)$$

$K_* = 2,0 - 2,4 \text{ мм/с}^{0,6}$, по формуле

$$\delta = K\tau^{0,7} \quad (9.13)$$

$K_* = 1,24 - 1,49 \text{ мм/с}^{0,7}$.

Результаты расчетов тепловых потоков и экспериментальные данные приведены на рисунке 9.2. Лучше всего согласуются с экспериментальными данными результаты расчетов тепловых потоков, в основу которых положена формула (9.12). Она принята в дальнейшем для описания динамики роста корочки слитка в кристаллизаторе, исключая первые секунды затвердевания, когда зависимость толщины корочки слитка от времени можно описать уравнением (9.9).

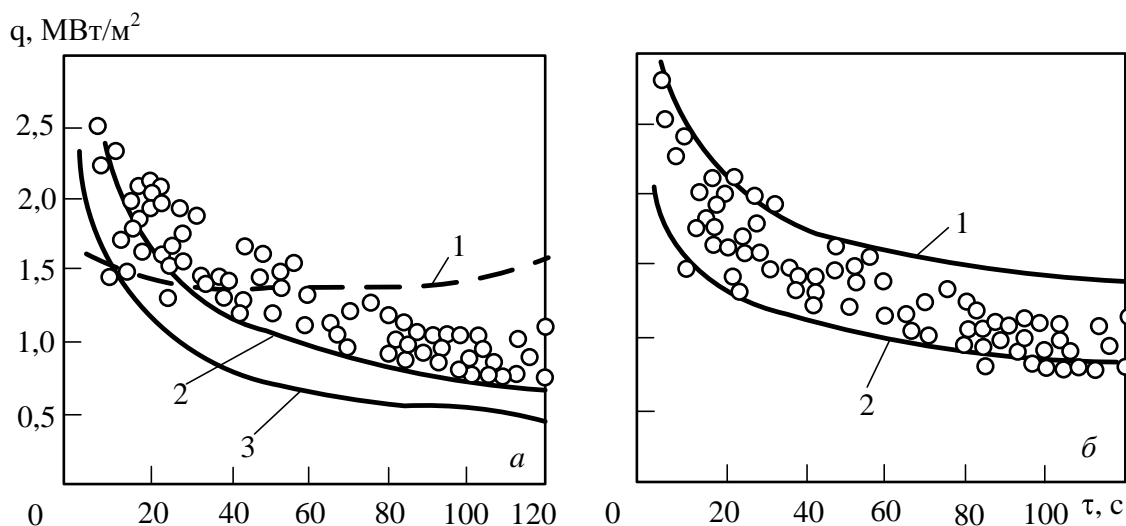


Рис. 9.2. Значения тепловых потоков q , рассчитанные при допущениях а и б: а – рост оболочки слитка подчиняется зависимости (7.13) при $K = 1,26 \text{ мм/с}^{0,7}$ (1), зависимости (7.10) при $K = 3,23 \text{ мм/с}^{0,5}$ (2), а при $K = 3,88 \text{ мм/с}^{0,5}$ (3); б – затвердевание оболочки слитка подчиняется зависимости (7.12) при $K_* = 2,0 \text{ мм/с}^{0,6}$ (1) и при $K_* = 2,4 \text{ мм/с}^{0,6}$ (2) (точки – экспериментальные данные)

Кроме того, формула (9.12) позволяет выяснить изменение температуры поверхности слитка, в то время как применение уравнения (9.10) предполагает ее постоянной.

С увеличением степени перегрева жидкого металла скорость затвердевания снижается (рис. 9.3). Особенно это заметно в верхней части кристаллизатора, где развиты гидродинамические процессы. Увеличение перегрева металла повышает количество тепла, подводимого к фронту затвердевания в единицу времени и приводит к замедлению роста корочки слитка. После выхода из зоны интенсивной циркуляции металла скорость затвердевания у слитков с большей и меньшей степенью перегрева примерно одинакова.

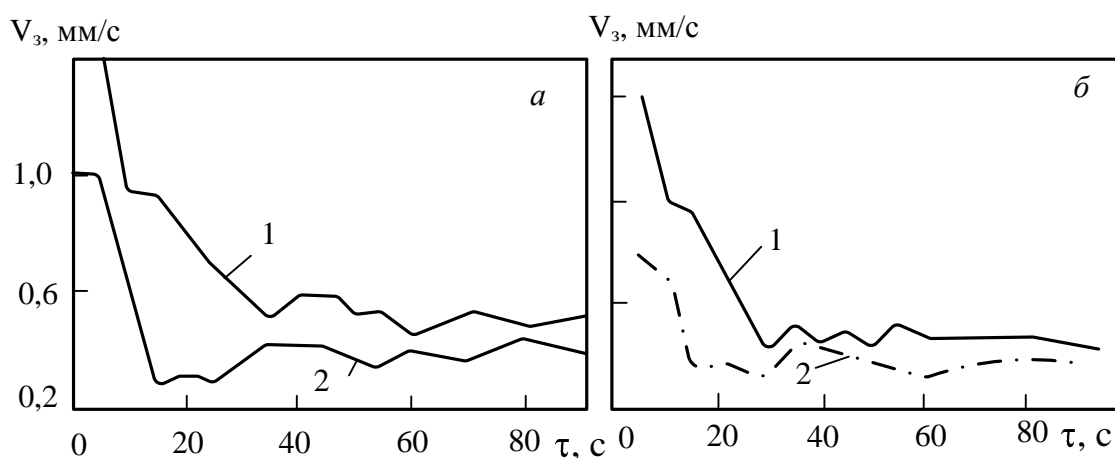


Рис. 9.3. Изменение во времени скорости затвердевания стали V_3 по широким (а) и узким (б) граням слитка при температуре жидкого металла 1525 (1) и 1550 °С (2)

Оценим количественно возможное влияние на затвердевание корочки слитка тепловых потоков, передаваемых от жидкой фазы.

При разливке стали марки Ст3 при температуре металла в промежуточном ковше 1845 К в районе струи металла, вводимой в кристаллизатор, экспериментально найденное значение теплового потока в течение 0 – 30 с от начала затвердевания составляет 0,57 мВт/м¹. Это соответствует приведенным на рисунке 9.4 результатам расчетов при перегреве $\Delta T_{ж} = 30$ К.

Тепловые потоки перегрева особенно велики в верхней части кристаллизатора (в начале затвердевания) (рис. 9.4). Они тем выше, чем больше ширина грани (а) и $\Delta T_{ж}$. С течением времени значения тепловых потоков при различной степени перегрева сближаются тем быстрее, чем больше коэффициент теплоотдачи.

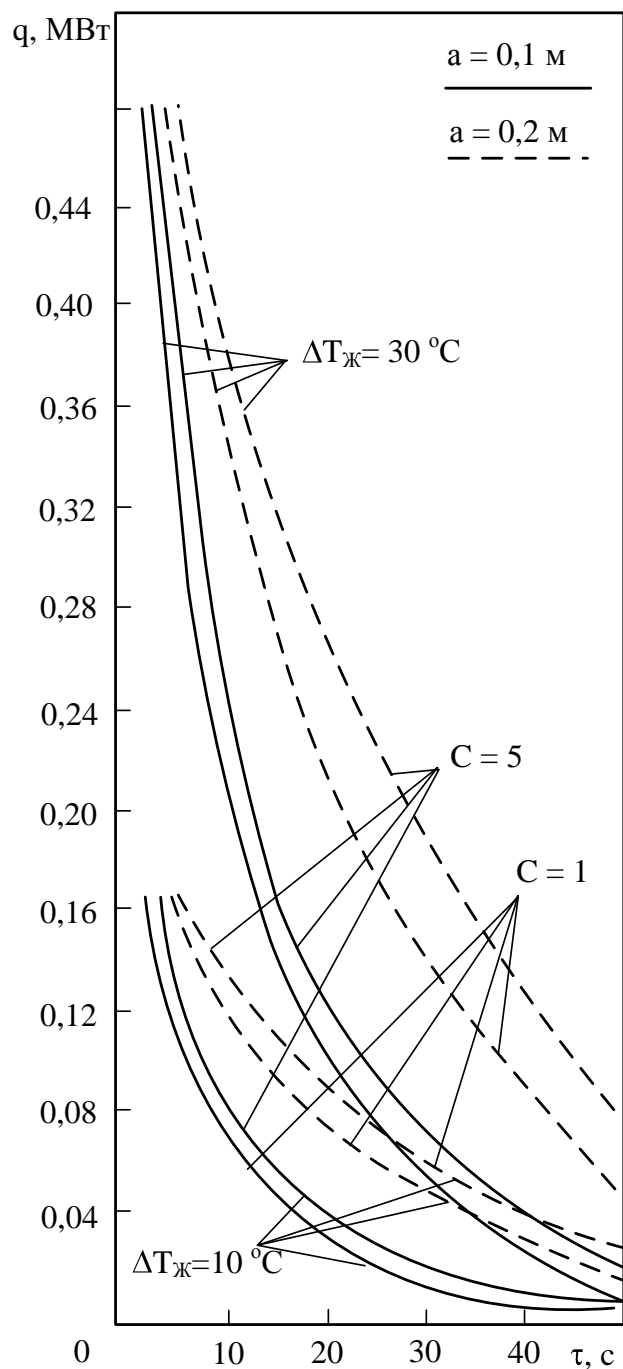


Рис. 9.4. Изменение во времени тепловых потоков q .
Коэффициент теплоотдачи $\alpha^* = 20 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C})$

Из рисунка 6.4 видно, что при одном и том же значении коэффициента теплоотдачи с ростом соотношения сторон сечения слитка или его толщины тепловые потоки перегрева несколько увеличиваются. Однако с ростом толщины слитка следует ожидать при прочих равных условиях снижение коэффициента теплоотдачи, а следовательно, влияние

тепловых потоков перегрева на затвердевание слитка может даже пасть.

Исходя из зависимостей, показанных на рис. 9.5, следует, что перегрев должен быть $\tau \cdot 10$ с, а коэффициент теплоотдачи $5 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{°C}$, т.е. необходимо разливать сталь с небольшим перегревом и низкими скоростями потоков на фронте затвердевания.

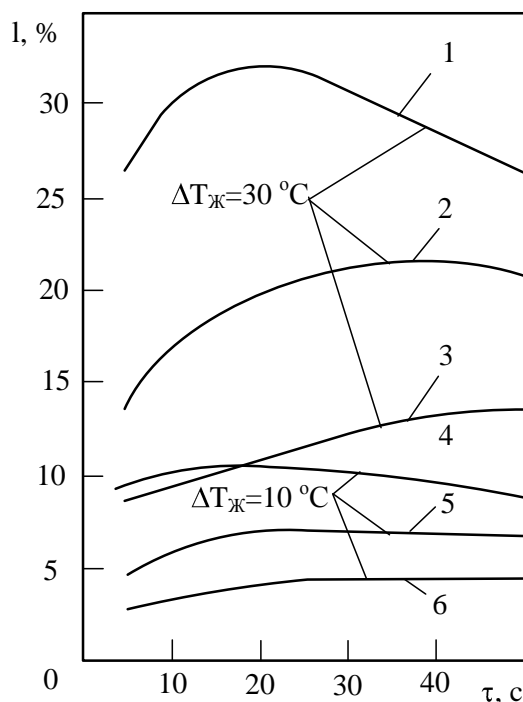


Рис. 9.5. Уменьшение толщины корочки слитка l под влиянием теплового потока перегрева: 1 и 4 — при $\alpha^* = 20 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$; 2 и 5 — при $\alpha = 10 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$; 3 и 6 — при $\alpha = 5 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$

С ростом скорости разливки будет увеличиваться скорость циркуляционных потоков, что приведет к возрастанию коэффициента теплоотдачи и соответственно влияния потоков жидкой фазы на толщину корочки. Для компенсации этого явления перегрев металла должен быть тем меньше, чем быстрее происходит разливка (точнее, чем больше α). При скоростной разливке необходимо совершенствовать условия ввода струи в кристаллизатор, добиваясь все меньшего значения коэффициента теплоотдачи в зоне, где велика опасность возникновения трещин (вблизи зеркала металла). В связи с этим все большее распространение получает разливка стали под уровень в кристаллизаторе.

9.3. Теплоотвод и затвердевание слитка в зоне вторичного охлаждения

Зона вторичного охлаждения (ЗВО) расположена между кристал-

лизатором и тянущими роликами. На этом участке необходимо обеспечить затвердевание слитка по всему поперечному сечению. Это обеспечивается сочетанием определенных значений скорости разливки и интенсивности наружного охлаждения заготовки. Характер теплообмена на поверхности слитка в ЗВО зависит от конструктивных особенностей этой зоны. Если между кристаллизатором и тянущими роликами отсутствуют опорные устройства и слиток остывает на воздухе, то теплообмен на поверхности слитка определяется законами излучениями Стефана-Больцмана и естественной конвекции Ньютона:

$$g_{\text{п}} = C \left[T_{\text{п}}/100^4 - T_{\text{в}}/100^4 \right] + \alpha_{\text{в}} T_{\text{п}} - T_{\text{в}} , \quad (9.14)$$

где $C = \epsilon C_0$ – коэффициент теплообмена излучением;

ϵ – степень черноты поверхности слитка (0,7 – 0,8);

$\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи, конвекцией;

$T_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха;

$g_{\text{п}}$ – плотность теплового потока на поверхности слитка.

Введем условный коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{и}} = C \theta$, где $\theta = [(T_{\text{п}}/100)^4 - (T_{\text{в}}/100)^4] / (T_{\text{п}} - T_{\text{в}})$. Тогда выражение (9.14) примет вид

$$g_{\text{п}} = \alpha T_{\text{п}} - T_{\text{в}} , \quad (9.15)$$

где $\alpha = \alpha_{\text{и}} + \alpha_{\text{в}}$ – суммарный коэффициент теплоотдачи. При скорости воздуха, подаваемого на поверхность слитка, не более 2 – 3 м/с $\alpha_{\text{в}} = 20 - 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{и}}$ можно подсчитать, используя значения параметра θ из таблицы 9.1.

Пусть $T_{\text{п}} = 1373 \text{ К}$ и $C = 4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, тогда, принимая $T_{\text{в}} = 273 \text{ К}$, получим, что $\theta = 32,2$ и $\alpha_{\text{и}} = 4 \cdot 32,2 \approx 129 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а суммарный коэффициент теплоотдачи $\alpha = 21 + 129 = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Осуществление свободного (без принудительного внешнего воздействия) охлаждения стального слитка в ЗВО возможно лишь при сравнительно малых скоростях разливки и для слитков небольшого поперечного сечения. С увеличением скорости разливки (что вызвано стремлением увеличить производительность МНЛЗ) повышается температура поверхности слитка и уменьшается толщина твердой оболочки слитка на выходе из кристаллизатора. В результате ферростатического давления жидкой стали оболочка слитка раздувается (выпучивается), что приводит к искажению формы слитка, а при наиболее неблагоприятных условиях может привести к прорыву жидкой стали. Для исключения выпучивания слитка и возможности прорыва жидкой стали применяют опорные устройства (ролики, брусья, балки) и увеличивают ин-

тенсивность охлаждения слитка.

Таблица 9.8

Значения параметра θ в зависимости от T_n и T_v

T_n, K	θ при T_v, K			
	273	373	473	573
1173	20,97	23,42	26,33	29,76
1273	26,21	28,96	32,20	35,98
1373	32,25	35,34	38,92	43,09
1473	39,18	42,60	46,58	51,20
1573	47,02	50,80	55,20	60,10
1673	56,00	60,90	64,90	70,30
1773	65,80	70,40	75,60	81,40

При попадании воды на раскаленную поверхность слитка происходит частичное испарение воды, что приводит к существенной теплоотдаче от поверхности слитка вследствие большой теплоты парообразования ($r = 2263$ кДж/кг).

При струйном охлаждении поверхности заготовки ($T_n = 1323$ К) относительное количество испаряющейся воды составило 8 – 10 % при изменении расхода воды от 2 до 7 м³/(м² ч). Оценим плотность теплового потока, расходуемого на испарение охлаждающей воды, Вт/м²

$$g_{\text{исп.}} = X \cdot r \cdot y_v \cdot g_v, \quad (9.16)$$

где g_v – удельный расход воды, м³/(м²·ч);

y_v – плотность воды, кг/м³;

X – доля воды, превратившейся в пар.

Пусть $g_v = 5$ м³/м² ч; $X = 0,1$, тогда $g_{\text{исп.}} = 0,1 \cdot 540 \cdot 1,16 \cdot 10^3 \cdot 5 = 313,2$ кВт/м². Введем условный коэффициент теплоотдачи испарением:

$$g_{\text{исп.}} = g_{\text{исп.}} \cdot (T_n - T_v) \quad (9.17)$$

Принимая $g_{\text{исп.}} = 313,2$ кВт/м²; $T_n - T_v = 1030$ К, получим $\alpha_{\text{исп.}} = 304$ Вт/(м² К).

Заметим, что эта величина почти вдвое превышает условный коэффициент теплоотдачи, характеризующий интенсивность теплообмена излучением с поверхности слитка.

Еще большие значения коэффициента теплоотдачи могут быть достигнуты при движении воды вдоль поверхности слитка при его струйном охлаждении. Уравнение конвективного теплообмена, связывающее значение коэффициента теплоотдачи α_k со средней скоростью

движения воды v , имеет вид

$$Nu = C_0 Re^{n_0}, \quad (9.18)$$

где $Nu = \alpha_k/\lambda_b$ – критерий Нуссельта;

$Re = vL/\nu$ – критерий Рейнольдса; L – характерный размер, λ_b и ν – значения коэффициентов теплопроводности и кинематической вязкости для охлаждающей воды;

C_0, n_0 – эмпирические коэффициенты.

В случае турбулентного режима течения в пограничном слое $C_0 = 0,032, n_0 = 0,8$, поэтому

$$\alpha_k = 0,032 \lambda_b/L (vL/\nu)^{0,8}. \quad (9.19)$$

В частности, принимая $v = 2,5$ м/с; $L = 1$ м; $\nu = 10^{-6}$ м²/с; $\lambda_b = 0,6$ Вт/(м·К), получим $\alpha_k = 2530$ Вт/(м² К). Таким образом, коэффициенты теплоотдачи, соответствующие турбулентному режиму течения вдоль поверхности слитка, превышают на порядок значения коэффициентов теплоотдачи, обусловленных излучением и испарением. Заметим, что критериальное уравнение (9.18) и вытекающее из него расчетное соотношение (9.19) получены для случая продольного смывания плоскости, когда вектор скорости конвективного потока направлен параллельно поверхности теплообмена.

Конвективный поток образует некоторый угол с обтекаемой поверхностью, при этом коэффициент теплоотдачи может возрасти в семь–восемь раз, главным образом, в результате уменьшения толщины пограничного слоя. Однако в реальной обстановке теплообмен на поверхности стальных слитков в ЗВО не соответствует условиям, при которых получено критериальное уравнение (9.18). Пограничный слой на поверхности слитка разрушается вследствие закипания воды и образования паровой «рубашки», в значительной степени понижающей интенсивность теплоотдачи. Теоретическая оценка коэффициентов теплоотдачи при форсуночном охлаждении поверхности слитка усложняется существенной неоднородностью поля скоростей воды (т.е. кинетической энергией струи), применяемых плоскофакельных форсунок, отекаемостью воды на орошаемый участок с соседних участков слитка, небольшими размерами участка орошения (недостаточными для стабилизации пограничного слоя) и т.д. При этом обнаружена существенная зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности орошения, расположения охлаждаемой поверхности и форсунки (т.е. расстояния от форсунки до плоскости и угла атаки струи), температуры охлаждаемой поверхности. Наклонное расположение форсунки по отношению к охлаждаемой

поверхности способствует пробиванию паровой пленки струями воды и увеличению коэффициента теплоотдачи по сравнению с расположением форсунки по нормали к поверхности. На рис. 9.6 представлена зависимость коэффициента теплоотдачи от удельного расхода воды, полученная двумя способами: по тепловому балансу ЗВО и по температуре поверхности слитка на выходе из ЗВО.

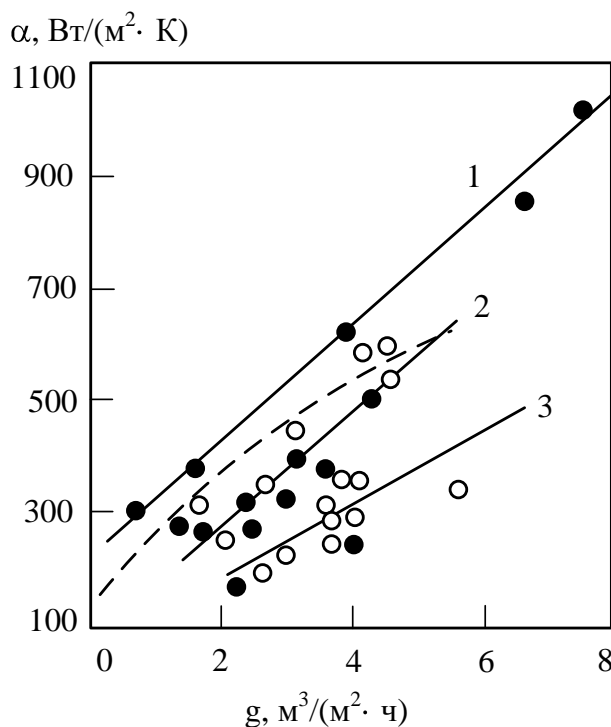


Рис.9.6. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от удельного расхода воды в ЗВО g : 1 – струйное охлаждение; 2 – брусьевое охлаждение; 3 – ролико-форсуночное охлаждение

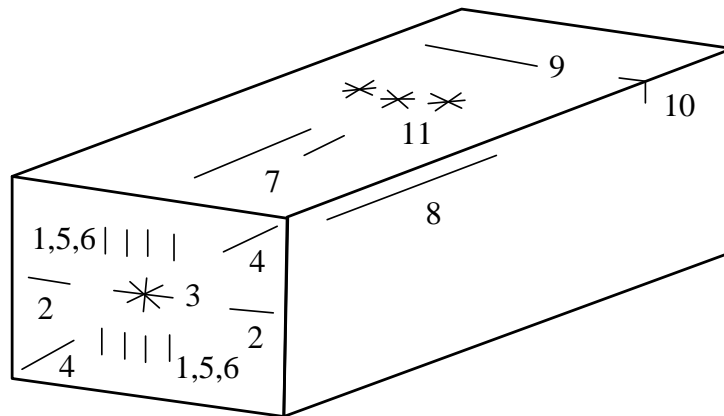
Данные рис. 9.6 позволяют сделать заключение, что при ролико-форсуночном или брусьевом охлаждении коэффициент теплоотдачи колеблется в пределах $140 - 540 \text{ м}^2 \cdot \text{К}$ (при изменении удельного расхода воды в пределах $1,5 - 4,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$). Такие значения коэффициента теплоотдачи соответствуют плотности теплового потока при частичном испарении охлаждающей воды ($5 - 15 \%$). Имеются основания, что поток излучения с поверхности слитка, нагретой до $1173 - 1373 \text{ К}$, почти полностью поглощается в паровой рубашке и сравнительно тонком слое воды (несколько миллиметров), покрывающих поверхность слитка при форсуночном водяном охлаждении.

9.4. Напряженное состояние оболочки при формировании слитка

Влияние технологических параметров разливки и химического состава стали на образование трещин в непрерывнолитых заготовках связано с механическими свойствами стали и напряжениями, возникающими в оболочке слитка при затвердевании. Установлена важная роль двух интервалов хрупкости. Первый включает в себя область температур более 1613 К и вызывает образование всех разновидностей внутренних трещин, а также появление наружных продольных трещин. Вторым интервалом хрупкости наблюдается при 973 – 1173 К и обусловлен легированием стали алюминием, ниобием и ванадием. Появление наружных поперечных трещин можно объяснить снижением пластических свойств стали во втором интервале хрупкости.

Формирование трещин в стальных непрерывных слитках является важной проблемой. Из приведенной на рисунке 9.7 схемы следует, что трещины образуются практически во всех участках слитка. Трещины в объеме возникают в районе углов, в осевой части и по диагонали между противоположными углами слитка. На поверхности продольные и поперечные трещины располагаются на гранях и в углах слитков.

Причина многообразия трещин заключена в природе самого процесса непрерывной разливки. Метод непрерывной разливки получил широкое распространение благодаря высокой скорости теплоотвода. Однако ускоренное охлаждение обуславливает появление и быстрое развитие в оболочке слитка значительных температурных градиентов, под давлением которых она сжимается и расширяется, что приводит к возникновению термических напряжений. Кроме того, полужакокристаллизовавшийся слиток в МНЛЗ подвергается действию различных механических нагрузок, вызванных трением в кристаллизаторе, обжатием валков, ферростатическим давлением, несовпадением осей различных частей машины, а также возникших при изгибе и правке слитков. Любое из перечисленных усилий может вызвать образование трещин в непрерывном слитке.



*Рис. 9.7. Схема слитка с различными видами трещин:
 1 – в промежуточной зоне; 2 – под ужиминами; 3 – осевая; 4 – диагональная;
 5 – возникающая при изгибе слитка; 6 – вызванная давлением валков;
 7 – продольная в центральной части грани; 8 – продольная угловая;
 9 – поперечная в центральной части; 10 – поперечная угловая;
 11 – гнездообразная*

Под влиянием трения между движущимися стенками кристаллизатора и оболочкой слитка в затвердевшей корке возникают напряжения, направленные параллельно оси слитка. При движении кристаллизатора вверх эти напряжения, являющиеся суммой осевых и изгибающих усилий, становятся растягивающими. Ферро-статическое давление, обеспечивая нормальную силу трения, при охлаждении и сжатии корки вызывает появление напряжений в поперечной плоскости.

Действие поперечных напряжений наглядно проявляется в торцах слитка, где они являются растягивающими и достигают максимальных значений у поверхности. Аналогичная схема напряжений может быть и вблизи углов, хотя в этом случае из-за наличия газового зазора картина будет менее четкой. Когда слиток находится в кристаллизаторе или выходит из него, перепад температур в затвердевшей корке вызывает появление термических напряжений. У поверхности с более низкой температурой эти напряжения будут растягивающими, а около фронта кристаллизации – сжимающими. Эпюра напряжений может быть и обратной, но в этом случае под действием внезапного уменьшения скорости охлаждения должна измениться также температура поверхности слитка.

За пределами кристаллизатора под действием ферростатического давления (при неправильно расположенных обжимных валках) может произойти раздутие слябов с большим соотношением сторон. На рисунке 9.8 видно, что на поверхности результирующие

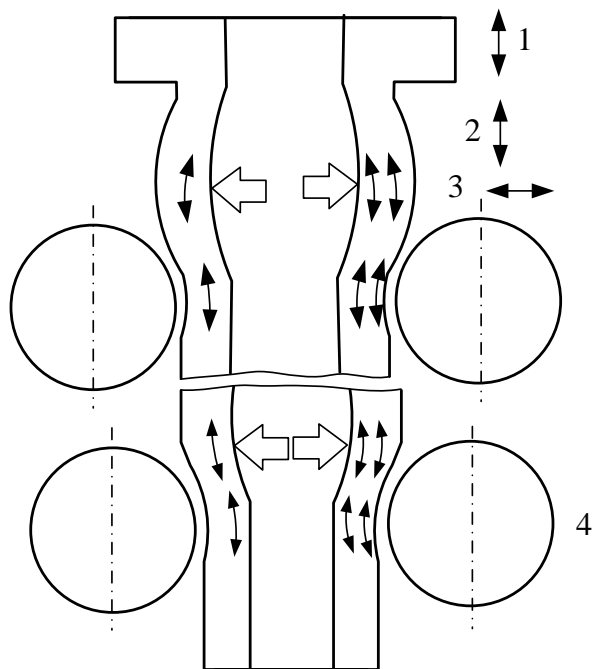


Рис. 9.8. Схема возникновения осевых напряжений в затвердевшей корочке слитка: 1 – растягивающие напряжения; 2 – сжимающие напряжения; 3 – ферростатическое давление; 4 – смещенные ролики

напряжения являются растягивающими, а у фронта кристаллизации – сжимающими. Если под кристаллизатором обжимные валки установлены правильно, то они давят на выпученную оболочку, и на фронте кристаллизации создаются уже не сжимающие, а растягивающие напряжения. Если валки расположены слишком близко друг к другу, то наблюдается аналогичное распределение напряжений.

При изгибе и правке слитка в затвердевшей корочке возникают значительные осевые деформации. Растягивающие напряжения при правке слитков возникают на верхней поверхности, а сжимающие – на нижней. В случае изгиба схема напряжений становится прямо противоположной. В направлении оси на затвердевшую корочку действует также сила тяжести, под влиянием которой в оболочке слитка возникают растягивающие напряжения. На величину этих напряжений оказывает влияние сила, создаваемая тянущими валками. Кроме того, напряжения могут быть вызваны и рядом других причин, например неполадками в МНЛЗ или неоднородным охлаждением в кристаллизаторе и ЗВО.

9.5. Структура непрерывного слитка

Структурная неоднородность. У непрерывных слитков корковая мелкозернистая зона, как правило, толще, зона столбчатых кристаллов

(при одном и том же сечении и температуре разливки) шире, а серединная зона равноосных кристаллов значительно меньше, чем у обычных слитков. Кристаллы столбчатой зоны непрерывного слитка тоньше, длиннее, более плотно упакованы, что связано с большой интенсивностью охлаждения.

Соотношение размеров структурных зон непрерывного слитка зависит от химического состава стали, поперечного сечения и технологических факторов разливки (температуры, скорости, режима охлаждения).

Металл в зоне транскристаллитов имеет пониженную пластичность (в особенности снижается ударная вязкость), поэтому желательно получать структуру с ограниченной столбчатой зоной и развитой зоной равноосных кристаллов с рассредоточенной усадочной пористостью в относительно большом объеме затвердевающего металла. Мелкие поры с незначительными следами химической неоднородности легко завариваются в процессе пластической деформации (прокатки,ковки). Структура получается такой, если в период затвердевания глубинной зоны замедлить отвод тепла от слитка (т.е. уменьшить градиент температуры в кристаллизующейся оболочке) или повлиять на затвердевание путем микролегирования, введения микрохолодильников, применения ультразвука, перемешивания электромагнитным полем и др. Эти способы расширяют зону твердожидкого состояния, увеличивая число активных частиц, способных выполнять роль зародышей новых кристаллов, уменьшают температурный градиент, снимают теплоту перегрева и кристаллизации (частично).

Дендритная химическая неоднородность (дендритная ликвация) – неоднородность содержания различных химических элементов по оси дендрита и по его периферии. Степень дендритной неоднородности определяется по соотношению содержания данного элемента на оси дендрита и в междендритных участках: чем больше это соотношение, тем больше неоднородность. Степень дендритной неоднородности легирующих элементов в обычном слитке значительно выше, чем в непрерывном, что заметно даже вблизи поверхностной зоны. По мере удаления от поверхности эта разница увеличивается. В центре степень дендритной неоднородности обычного слитка на 30 % выше, чем непрерывного. Различие в степени дендритной неоднородности может быть объяснено неодинаковыми скоростями затвердевания и дисперсностью дендритного строения. Увеличение степени неоднородности вызвано повышением концентрации элемента в межосных участках. Содержание легирующих элементов в осях дендритов практически одинаково по сечению обоих слитков и не зависит от способа разливки, что свидетель-

ствуется о постоянстве температуры кристаллизации осевых участков дендритов.

Средний химический состав обычного и непрерывного слитков одинаков, несмотря на значительные различия в микронеоднородности, объясняемые иным соотношением объемов металла, которые занимают оси дендритов и межосные участки.

Зональная химическая неоднородность (зональная ликвация). Непрерывный слиток имеет сравнительно небольшое сечение, скорость затвердевания его выше, а время кристаллизации меньше, чем у обычного слитка, поэтому зональная неоднородность на участке от поверхности к оси слитка не получает значительного развития.

При разливке холодной и плохо раскисленной спокойной стали, а также при избытке смазки или попадании влаги с какими-либо материалами возникает точечная и пятнистая неоднородность.

Точечная неоднородность выявляется на поперечных темплетах в виде мелких черных точек, разбросанных по полю. Точки представляют собой скопления неметаллических включений (главным образом сульфидов) и шлаков. Точечная неоднородность может несколько снизить пластические свойства стали в поперечных образцах.

Пятнистая неоднородность выявляется в виде пятен различного размера. В этих местах под микроскопом обнаруживают скопления сульфидных включений. Пятнистая неоднородность снижает пластические свойства стали (относительное сужение и ударную вязкость) в поперечных образцах и не влияет на механические характеристики в продольных.

Неоднородность химического состава по высоте слитка. Продолжительность непрерывной разливки одной плавки из больших ковшей доходит до 2 ч. В течение этого периода в ковше могут протекать реакции между металлом, шлаком и футеровкой, в результате чего изменяется состав жидких фаз и возникает химическая неоднородность по высоте слитка. Особенно нежелательно восстановление фосфора.

Полосчатая неоднородность (ликвационные полосы) обнаруживается на серых отпечатках в виде линий, перпендикулярных граням слитка. Ликвационные полосы – следствие трещин, образующихся в металле чаще всего вдоль дендритных осей первого порядка столбчатой зоны. В трещины под действием разрежения засасывается обогащенный примесями жидкий металл, находящийся у фронта затвердевания. Для устранения этого вида неоднородности следует предотвращать возникновение деформаций, приводящих к трещинам (не обжимать имеющие жидкую сердцевину слитки с критической величиной деформации, избегать образования термических напряжений больше допустимых и

др.).

Внеосевая неоднородность. В непрерывных слитках такой вид неоднородности развит слабо. Присадки редкоземельных элементов, которые обуславливают выделение сульфидов на более ранней стадии кристаллизации, т.е. фиксацию сульфидов в структуре в виде тугоплавких высокодисперсных соединений, позволяют не допустить возникновения этого вида неоднородности.

Осевая химическая неоднородность. Осевая химическая неоднородность (а также физическая неоднородность) образуется при обогащении (вследствие ликвации) внутренних зон примесями и усадке металла в замкнутом объеме в процессе затвердевания осевой зоны. Неоднородность несколько уменьшается с понижением температуры и скорости разливки.

На осевую неоднородность влияет режим раскисления: при раскислении стали ферросилицием, алюминием (0,4 кг/т) с добавкой ферротитана (1 – 1,5 кг/т) металл получается более однородным, чем при раскислении ферросилицием, алюминием (0,3 кг/т) и силикокальцием. Осевая неоднородность уменьшается также при введении в кристаллизатор алюминия (1 – 1,5 кг/т стали). Модифицирование стали ферротитаном повышает однородность осевой зоны, но может привести к загрязнению металла крупными неметаллическими включениями. В листовых заготовках осевая химическая неоднородность образуется при встрече двух фронтов затвердевания. Обогащенная ликватами центральная зона может вызвать расслоение листов. Увеличение ширины зоны неориентированных дендритов улучшает качество осевой зоны.

Физическая неоднородность (разрывы в структуре металла: осевая пористость, трещины, пузыри). Природа этого дефекта различна: осевая пористость образуется при затвердевании металла в замкнутом объеме, куда не проникает жидкая фаза; трещины появляются вследствие деформаций, превышающих допустимые; пузыри обусловлены выделением газов из кристаллизующейся стали.

Усадочные процессы, вызывающие физическую неоднородность, сопровождаются также химической неоднородностью. На продольном темплете осевая пористость имеет F-образную форму, что объясняется действием сил тяжести на объемы жидкой фазы, затвердевающие по оси слитка в последнюю очередь. Осевая пористость может иметь вид отдельных усадочных раковин или быть сосредоточенной, когда разобщенные пустоты сливаются в цепочку вдоль оси слитка.

Плотная осевая зона без сосредоточенной пористости получается при увеличении интенсивности вторичного охлаждения, верхняя граница которой должна устанавливаться экспериментально. Чрезмерное рез-

кое охлаждение может привести к появлению внутренних трещин.

Внутренние трещины образуются при неправильном режиме вторичного охлаждения слитка. Чувствительность стали к внутренним трещинам возрастает с увеличением концентрации некоторых легирующих элементов (например, хрома), серы и фосфора. Очень чувствительны к образованию внутренних трещин стали ферритного класса.

Трещины могут быть обнаружены на поперечных темплетах слитков. По расположению различают следующие виды трещин: перпендикулярные узким граням; перпендикулярные широким граням (расположенные, как правило, по ужиминам и ближе к узким граням); направленные к углам и расположенные по стыкам кристаллов, растущих от широких и узких граней. Эти трещины обусловлены ромбичностью (параллелограммностью) слитка и располагаются против тупых углов; вначале перпендикулярные широкой грани, а затем направленные по стыку кристаллов (по биссектрисе угла); осевые, расположенные в районе встречи фронтов затвердевания.

Трещины первого и второго видов образуются при резком охлаждении грани слитка или отдельного участка поверхности, которое приводит к прогибу грани вовнутрь и к возникновению в горячих слоях у фронта затвердевания недопустимых растягивающих деформаций. Трещины первого и второго видов устраняются отработкой режима вторичного охлаждения. Равномерное охлаждение слитка по периметру и снижение интенсивности охлаждения углов позволяют ликвидировать трещины третьего вида. Трещины четвертого вида являются следствием напряжений, действующих вдоль смежных узких и широких граней, их устраняют так же, как трещины первого и второго видов. Трещины пятого вида образуются в результате разогрева наружных слоев после смыкания фронтов затвердевания. При этом широкие грани стремятся выпучиваться, что вызывает напряжения по оси слитка, которые могут привести к появлению осевых трещин. Чтобы такие напряжения не возникли, слиток в период затвердевания осевой зоны до момента ее достаточного упрочнения следует охлаждать с интенсивностью, не допускающей уменьшения перепада температур между осевой и поверхностной зонами.

Расслои в макроструктуре листа, связанные с внутренними трещинами, устраняют отработкой режима вторичного охлаждения.

Особенности затвердевания и структуры непрерывного слитка псевдокипящей стали. В непрерывном слитке псевдокипящей стали различают три зоны; корковую, сотовых пузырей и центральную.

Корковая зона непрерывного слитка формируется в кристаллизаторе и имеет толщину $(15-30) \cdot 10^{-3}$ м. Толщина корки тем больше, чем

ниже скорость, температура разливки, содержание углерода и выше окисленность металла. Корка в ряде случаев (особенно для стали 08кп) получается недостаточно плотной, с мелкими пузырями, образование которых можно объяснить неблагоприятными условиями для их отрыва при формировании непрерывного слитка.

Образование зоны сотовых пузырей начинается в нижней части кристаллизатора или в начале ЗВО и распространяется (в отличие от обычного слитка) практически на всю длину непрерывного слитка. Ширина ее определяется интенсивностью кипения металла. Эта зона тем шире, чем меньше окисленность и выше температура.

Протяженность зоны сотовых пузырей в стали со средним содержанием углерода (0,17 – 0,22 % С) уменьшается с увеличением скорости разливки. В кипящем металле с низким содержанием углерода (0,10 – 0,15 % С) наблюдается обратная картина.

С увеличением содержания углерода до 0,05 – 0,09 % длина зоны сотовых пузырей уменьшается, а при дальнейшем повышении концентрации углерода увеличивается. Низкое содержание углерода, серы и фосфора в зоне кипения способствует уменьшению трещинообразования. Находящиеся в зоне кипения пузыри приводят к разрядке возникающих усадочных напряжений. Центральная зона в непрерывном слитке низкоуглеродистой стали занимает не более 1/3 поперечного сечения (в отдельных случаях всего 10 – 15 %), что обусловлено наличием сильно развитой зоны кипения. Кристаллизация центральной зоны происходит при значительно большем, чем в обычных слитках, ферростатическом давлении. Это обстоятельство снижает (а при низкой окисленности даже подавляет) газообразование, поэтому в центральной зоне малоокисленной кипящей стали со средним содержанием углерода пузырьки отсутствуют или имеют незначительное развитие.

Плотность и ширина центральной зоны в непрерывном слитке псевдокипящей стали зависят также от окисленности металла. Качественный слиток псевдокипящей стали должен иметь плотную беспузыристую корку достаточной толщины и хорошую поверхность без трещин и шлаковых включений. Непрерывный слиток псевдокипящей стали отличается от обычного однородностью по высоте и меньшей сегрегацией примесей по сечению.

Состав и количество неметаллических включений примерно такие же, как и в обычном слитке кипящей стали.

Большая химическая, физическая и структурная однородность непрерывного слитка (по сравнению со слитками, отлитыми в изложницу) обуславливает в среднем более высокие механические характеристики проката из этого слитка.

9.6. Методы электромагнитного воздействия на кристаллизующийся металл

В мировой практике непрерывной разливки разрабатываются и используются разные методы электромагнитного воздействия на кристаллизующийся металл. Но прежде других электромагнитное перемешивание (ЭМП или EMS) жидкого металла на МНЛЗ стало неотъемлемой частью прогрессивной технологии получения высококачественных заготовок. Учитывая требования к качеству непрерывнолитого металла, применяют несколько вариантов перемешивания в зависимости от системы EMS: в кристаллизаторе (MEMS), в зоне вторичного охлаждения (SEMS), в зоне окончательного затвердевания (FEMS) и комбинированное перемешивание, когда оно осуществляется в нескольких позициях.

Наиболее воздействуют на качество заготовок сортовых и блюмовых МНЛЗ устройства ЭМП, размещенные в кристаллизаторе.

ЭМП предназначены для создания с помощью электромагнитных сил перемешивающих потоков в жидкой фазе заготовки. При этом происходят интенсификация теплообмена в объеме затвердевающего металла, выравнивание градиента температур и химического состава внутри заготовки, интенсификация теплообмена с окружающей средой, разрушение фронта кристаллизации.

Более интенсивное движение потока вдоль области затвердевания улучшает теплоотдачу. Перегрев примерно на 80 град. (над линией ликвидуса) без перемешивания снимается самое раннее через 180 с, тогда как при ЭМП – уже через 100 с [84].

На ЭМП в кристаллизаторе к перечисленным особенностям процесса добавляются: перенос неметаллических включений и других частиц из объема расплава к поверхности раздела металл–шлак; ускорение столкновения включений, их рост и повышение скорости удаления из металла; ликвидация застойных зон.

Качество непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) с ЭМП зависит от интенсивности перемешивания. Показателем интенсивности ЭМП в мировой практике принято считать достигаемое максимальное значение линейной скорости жидкого металла в потоке, которую должен развивать статор ЭМП ($v_{\max} = 0,3 - 1,0$ м/с). При $v_{\max} < 0,3$ м/с эффективность перемешивания уменьшается и получение удовлетворительных металлургических результатов по макро- и микроструктуре становится проблематичным. При $v_{\max} > 1$ м/с появляются отрицательные металлургические результаты: поры вдоль фронта кристаллизации и высокая отрицательная ликвация. Кроме того, увеличивается расход электроэнергии без какого-либо улучшения качества заготовок по сравнению с ЭМП

при $0,3 \text{ м/с} < v_{\text{max}} < 1,0 \text{ м/с}$.

При движении стали с оптимальной скоростью вдоль фронта затвердевания сокращается опасность «захвата» неметаллических включений, пузырьков газа в растущих дендритах. Этим «вымывающим действием» объясняется высокая чистота подповерхностной зоны слитка. При турбулизации движения жидкого металла облегчаются условия обламывания ветвей растущих кристаллов. Обломки кристалла становятся дополнительными центрами кристаллизации, тем самым интенсивно подавляется рост столбчатых кристаллов, что приводит к более равномерному фронту затвердевания и расширению зоны мелких равноосных кристаллов.

Максимальное значение линейной скорости жидкого металла в потоке является сложной функцией геометрических размеров статора ЭМП и заготовки, угловой скорости, индукции магнитного поля, электропроводности, плотности и вязкости жидкой стали. Статор ЭМП – электрическая машина с большим воздушным зазором (чем больше зазор, тем выше потребляемая мощность), с обмоткой, имеющей значительную токовую нагрузку, интенсивное водяное охлаждение.

Устройство ЭМП для кристаллизатора чаще всего выполняется зарубежными фирмами в виде статора асинхронного двигателя, близкого по конструкции к традиционному исполнению электрической машины. При этом корпус кристаллизатора с ЭМП охватывается снаружи корпусом статора.

Установки EMS (SEMS) в зоне вторичного охлаждения являются альтернативой (особенно для разлива в блюмы). SEMS располагают ниже и вблизи кристаллизатора, они улучшают качество центральной части заготовки по сравнению с EMS. Для слябов выгодно использование SEMS (особенно при производстве ферритной нержавеющей стали и стали с повышенным содержанием кремния). Для дальнейшего уменьшения и сглаживания пиков в центре сегрегации может быть использована концевая установка электромагнитного перемешивания (FEMS) в комбинации с EMS или SEMS. FEMS особенно эффективна при разливе углеродистых или легированных сталей для уменьшения образования цементита или мартенсита.

Устранение дефектов заготовки с помощью установок EMS (ЭМП) представлено в таблице 9.9.

Таблица 9.9

Устранение дефектов заготовки с помощью установок ЭМП

Дефект заготовки	Установка		
	MEMS	SEMS	FEMS
Шлак на поверхности	*	-	-
Подкорковые пузыри	*	-	-
Подповерхностные включения	*	-	-
Раковины	*	-	-
Прорывы металла	*	-	-
Столбчатая структура	*	*	-
Внутренние трещины	*	*	-
Сегрегация в центре	*	*	*
Центральная пористость	*	*	*
V-образная сегрегация	-	-	*

Примером устройства ЭМП, расположенного отдельно от кристаллизатора, является предложенное фирмой «Rotelec», в котором трехфазный статор с вращающимся магнитным полем помещен в герметичный цилиндрический корпус из стали аустенитного класса. В корпус для охлаждения обмотки подается техническая вода, к которой предъявляются особые требования по кислотности, количеству неметаллических включений и их величине, поскольку все это разрушающе действует на изоляцию обмотки.

Такая конструкция использована фирмой «Danieli» в 1998 г. на заводе фирмы «Ispat Stahlwork Ruhrort» (Германия) при отливке заготовок сечением 130×130 мм из специальных сталей с номинальной скоростью 3,5 м/мин, а также на заводе фирмы «Acindar» при разливке сортовых заготовок сечением от 120×120 до 180×180 мм и слябовых сечением от 127×150 до 127×406 мм (рис. 9.9).

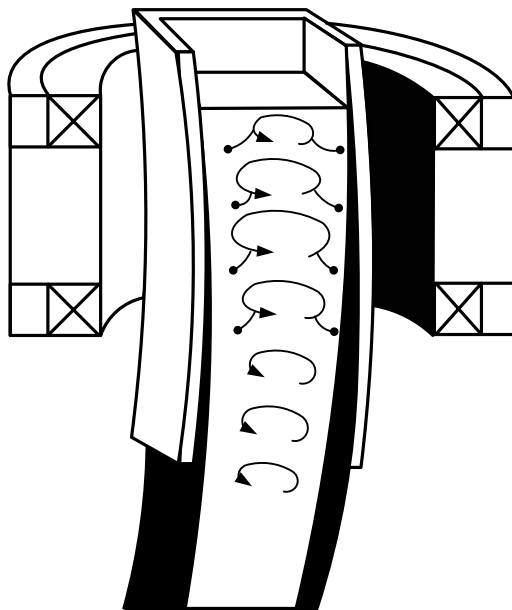


Рис.9.9. Конический криволинейный кристаллизатор с катушкой для электромагнитного перемешивания

На заводе «Ruhrort» со скоростью 3,5 м/мин отливаются стали автоматные, кордовые, для холодной высадки, высокоуглеродистые, рессорно-пружинные, для волочения, боротитановые с погружным стаканом под шлакообразующей смесью.

При этом достигнуто следующее улучшение качества НЛЗ:

- на поверхности – отсутствие поперечных или продольных трещин, уменьшение количества точечных дефектов на 80 %, уменьшение глубины следов от качания кристаллизатора до 0,6 мм и менее для низкоуглеродистых, до 0,4 мм и менее для высокоуглеродистых сталей;

- внутренние характеристики – толщина гомогенного поверхностного слоя 10 мм и более, уменьшение количества прогаров на 80 %, отсутствие или минимальное количество внутренних трещин, не влияющее на качество промежуточной продукции, равноосная структура (при ЭМП ≥ 40 %), углеродная ликвация (при ЭМП 1,12/1,14);

- допуски на геометрические размеры – ромбовидность $\leq 1,25$ %, серповидность $\leq 1,00$ % (боковая), выбоины $\leq 1,00$ % (боковые, для перитектических сталей).

На заводе «Acindar» уменьшено количество пор, раковин и подповерхностных включений в заготовках, уменьшен захват шлака металлом.

Доля равноосных кристаллов в слитке зависит от марки разливаемой стали. При содержании углерода в стали менее 0,20 % зоны равноосных кристаллов занимают менее 30 %, а при содержании углерода

более 0,20 % – менее 50 % площади поперечного сечения. Осевая ликвация углерода также зависит от марки стали. Для сталей с $C < 0,20$; 0,20 – 0,50 и 0,50 % соответствующие средние значения CCS не превышают 1,10; 1,10 – 1,12 и 1,12.

Во ВНИИМЕТМАШ разработана конструкция встроенного устройства ЭМП для двух типов кристаллизаторов Молдавского металлургического завода с целью снижения мощности, потребляемой при ЭМП (в два–пять раз по сравнению с зарубежными аналогами), в зависимости от сечения отливаемой заготовки при одинаковом воздействии на жидкую фазу.

Для литых заготовок сечением 135×135 мм рядовых марок стали устройство ЭМП было установлено в верхней зоне кристаллизатора (длина активной зоны статора 410, длина кристаллизатора 800 мм, активная мощность статора 11 кВт). Схематическое изображение кристаллизатора представлено на рисунке 9.10, а.

По результатам металлографических исследований установлено, что при ЭМП в кристаллизаторе улучшаются все показатели, определяющие качество НЛЗ. Так, средний балл по точечной неоднородности снизился на единицу, а максимальный балл по этому дефекту уменьшился с 4 до 2. При этом толщина подповерхностного слоя, чистого от неметаллических включений, увеличилась с 7 – 8 в серийных заготовках до 14 – 15 мм в заготовках с ЭМП. В 1,5 – 2 раза уменьшились количество и балл подкоркового пузыря, а также в 2 – 2,5 раза уменьшились максимальный диаметр пузыря и максимальная глубина его залегания.

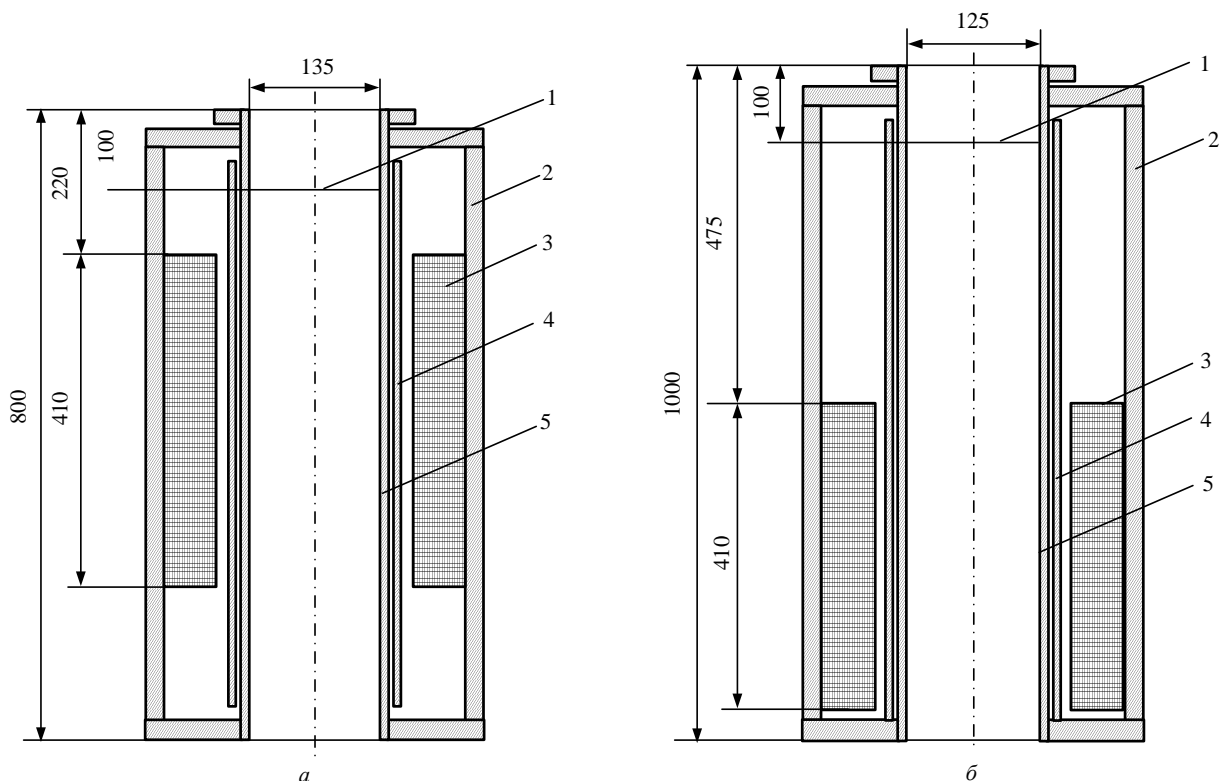


Рис. 9.10. Схемы кристаллизаторов с ЭМП для отливки НЛЗ сечением 135×135 (а) и 125×125 (б) мм: 1 – мениск жидкого металла; 2 – корпус кристаллизатора; 3 – статор ЭМП; 4 – обечайка; 5 – гильза

С целью повышения качества макроструктуры НЛЗ из качественных и высокоуглеродистых марок сталей сортамента ММЗ в 1999 г. во ВНИИМЕТМАШ разработан кристаллизатор ЭМП для литья сортовых заготовок сечением 125×125 мм с применением гильзы кристаллизатора длиной 1000 мм (рис. 9.10, б). Электромагнитное перемешивающее устройство было установлено в нижней части кристаллизатора.

Мощность статора была повышена до 30 кВт. Скорость разливки составляла 1,9 – 4,0 м/мин. В результате металлографических исследований опытных и контрольных темплетов было выявлено следующее влияние ЭМП на качество макроструктуры НЛЗ:

- снижение среднего балла по трещинам в промежуточной зоне слитка стали высокоуглеродистой с 0,6 до 0,2, среднеуглеродистой – с 2,1 до 0,5;

- снижение по сравнению с контрольным ручьем среднего балла по трещинам в осевой зоне слитка стали высокоуглеродистой – с 0,6 до 0,4, среднеуглеродистой – с 1,4 до 0,5;

- снижение по сравнению с контрольным ручьем среднего балла по центральной пористости стали высокоуглеродистой с 2,4 до 2,2, среднеуглеродистой – с 2,8 до 1,8;

– снижение среднего балла по краевым точечным загрязнениям по сравнению с контрольным ручьем для среднеуглеродистых сталей с 3,0 до 2,5, при этом в опытных НЛЗ достигнуто более равномерное распределение неметаллических включений по малому радиусу;

– снижение коэффициента ликвации углерода в высокоуглеродистых сталях с 1,09 до 1,04.

Экспериментально выявлено значительное влияние применения ЭМП на кристаллическую структуру опытных заготовок. Обнаружено, что макроструктура всех исследованных темплетов состоит из трех зон: корковой мелкозернистой, столбчатых кристаллов и осевой равноосных кристаллов.

В коммерческом предложении для сортовой МНЛЗ (заготовки размером 120×120 и 150×150 мм) металлургического завода в Енакиеве одна из зарубежных фирм предлагает устройство ЭМП в кристаллизаторе (А) с приводимыми ниже параметрами, расчет по которым максимальной скорости потока жидкого металла, определяющей эффективность ЭМП, дает 0,33 м/с для заготовки сечением 150×150 мм. Для этой же скорости (Б), а также для $v_{\max} = 0,65$ м/с в номинальном режиме (В) и заготовки того же сечения приведены (таблица 9.10) энергетические и конструктивные параметры устройства ЭМП оптимальной конструкции АХК ВНИИМЕТМАШ, ЗАО ЭМТ.

Как видно из приведенных данных, при одинаковой скорости в потоке (0,33 м/с) полная мощность устройства ЭМП оптимальной конструкции ВНИИМЕТМАШ меньше почти на порядок, а масса меньше более чем в три раза. Однако $v_{\max} = 0,33$ м/с может оказаться недостаточной для получения положительных металлургических результатов. Как видно, при скорости, определяющей эффективность процесса ЭМП, вдвое большей (0,65 м/с) по сравнению со скоростью, развиваемой статором зарубежной фирм (0,33 м/с), устройство ЭМП оптимальной конструкции имеет почти втрое меньшую активную мощность и, следовательно, в три раза больший КПД электромагнитного перемешивателя, встроенного в кристаллизатор.

Таблица 9.10

Энергетические и конструктивные параметры устройства ЭМП

Параметры	Устройство ЭМП		
	А	Б	В
Расстояние между полюсами, мм	400	200	200
Число фаз	3	2	2
Толщина гильзы, мм	10	14	14
Частота питания, Гц	2,5	8	7
Индукция в центре (max), Тл	0,1	0,042	0,0984
Ток фазы, А	325	57	150
Напряжение фазы, В	234	220	400
Активная мощность, кВт	140,6	10,6	48,0
Внешний диаметр, мм	726	525-	525
Внутренний диаметр, мм	400	200	200
Длина, мм	500	500	500
Масса, кг	400	120	120
Электрическая проводимость гильзы кристаллизатора, % от проводимости меди	95	87	87

О высокой эффективности влияния устройства ЭМП, встроенного в кристаллизатор, на качество поверхности заготовок и их загрязненность металлическими включениями сообщают также японские исследователи [89].

Приведенные устройства ЭМП являются «короткими», т.е. не охватывающими кристаллизатор по всей его длине.

Расположение короткого устройства ЭМП в нижней части кристаллизатора увеличенной длины для сортовой заготовки или частично за выходом для бруса может при определенных условиях обеспечить соответствие требованиям к перемешиванию как для кристаллизующейся массы, так и для мениска, но только при литье под уровень.

Вне зоны активного перемешивания, границы которой определяются высотой ЭМП, скорость перемешивания снижается по мере увеличения расстояния от ЭМП. На интенсивность снижения скорости перемешивания влияет геометрия поперечного сечения кристаллизатора.

Чтобы обеспечить необходимую в конкретном случае скорость перемешивания в менисковой зоне, длину однокатушечного ЭМП и его расположение относительно мениска выбирают так, чтобы получить подходящее в данном случае расстояние. В частности, «длинное» устройство ЭМП, охватывающее кристаллизатор по всей его длине, является более подходящим для литья открытой струей, когда для уменьшения

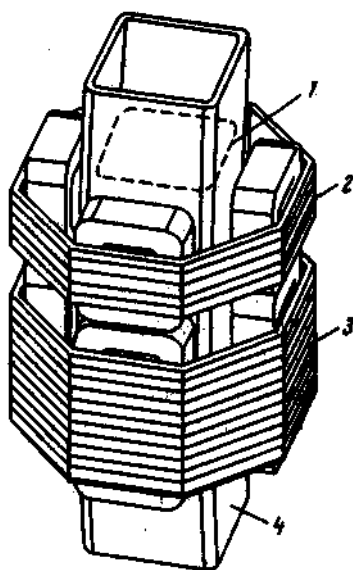
поверхностной пористости требуется значительное перемешивание в менисковой зоне.

Однако ни то, ни другое устройство не обеспечивает гибкого регулирования ЭМП металла в кристаллизаторе.

С целью устранения недостатков стационарных длинного и короткого устройств ЭМП используется перемещаемое короткое устройство ЭМП. Такое УЭМП располагается вне корпуса кристаллизатора и может позиционироваться на заранее определенных уровнях между мениском и низом кристаллизатора. Понятно, что помимо увеличения мощности в связи с увеличением диаметра недостатком таких ЭМП является невозможность обеспечить перемешивание, которое бы постоянно удовлетворяло требованиям по его интенсивности в менисковой зоне и зоне кристаллизующейся массы одновременно.

Очевидно, что управление турбулентным потоком в менисковой зоне не должно зависеть от управления потоком в кристаллизаторе и однокатушечное УЭМП для этого не подходит. Поэтому в середине 1990-х годов была разработана двухкатушечная система для обеспечения независимого управления перемешиванием в менисковой зоне. Схема двухкатушечного УЭМП показана на рис. 9.11: система состоит из двух индукторов; один индуктор располагается вокруг менисковой зоны кристаллизатора, а другой – вокруг нижней части подобно тому, как это сделано в коротком ЭМП. Каждый индуктор имеет отдельный источник питания. Этим обеспечивается независимое управление магнитными полями.

Регулируя напряженность магнитного поля, создаваемого верхним индуктором, можно управлять скоростью перемешивания в менисковой зоне. Результатом изменения направления вращения магнитного поля верхнего индуктора относительно вращения магнитного поля нижнего индуктора является его превращение в магнитный тормоз; скорость вращения расплава в области мениска в этом случае может быть снижена до нуля, когда вращающий момент от нижнего индуктора сбалансирован моментом от верхнего индуктора.



*Рис. 9.11. Схема двухкатушечной системы ЭМП в кристаллизаторе:
1 – мениск; 2 и 3 – верхний и нижний индукторы; 4 – кристаллизатор*

В большинстве случаев для получения более совершенной структуры кристаллизации и более высокого качества заготовки в целом в основном объеме кристаллизующейся массы требуется лишь ее интенсивное перемешивание, в зоне мениска требования к качеству перемешивания значительно многообразнее. Управление потоком жидкости в менисковой зоне необходимо потому, что между поведением потока жидкости и качеством поверхности отлитых изделий существует прямая зависимость. С одной стороны, поскольку кристаллизация поверхности заготовки начинается в менисковой зоне, любое нарушение мениска приводит к появлению рябизны, поперечных ужимин и трещин на кристаллизованной поверхности заготовки. С другой – управляемая интенсивность перемешивания – эффективный инструмент для уменьшения пористости поверхности, подповерхностных включений и нахлестов в сортовых заготовках и блюмах при литье под уровень. Что касается практики разлива под уровень, перемешивание в менисковой зоне ограничивается минимальной величиной во избежание нарушения смазки кристаллизатора, а также затягивания шлакообразующей смеси и эрозии разливочного стакана.

Скорость вращения металла в менисковой зоне можно также снизить наложением горизонтального магнитного поля постоянного тока, создаваемого верхним индуктором. Однако магнитное поле переменного тока, создаваемое верхним индуктором, позволяет не только значительно снижать скорость перемешивания в менисковой зоне при литье под уровень, но и увеличивать ее в случае литья открытой струей. Ис-

точник питания позволяет автоматически переключаться с переменного тока на постоянный и наоборот при питании верхнего индуктора.

Так как главный перемешиватель двухкатушечного УЭМП располагается в нижней части кристаллизатора, для более эффективной борьбы с пористостью и подповерхностными включениями в стальной отливке при заливке открытой струей часто требуется увеличить скорость перемешивания. Это достигается согласованным направлением вращения магнитных полей переменного тока верхнего и главного индукторов. Другими словами, верхний индуктор работает в режиме поддержки главного индуктора.

Было замечено, что в определенных условиях во время торможения переменным током в углах кристаллизатора квадратного сечения развивается турбулентность. Величина турбулентности может быть значительной и влиять на всю менисковую зону. Такая ситуация может возникнуть из-за неадекватного выбора конструкции и рабочих параметров главного и верхнего индукторов. Чрезмерная турбулентность мениска, создаваемая вертикальными потоками в углах формы, может негативно влиять на процесс литья и качество конечного продукта.

После оптимизации параметров упомянутой выше конструкции турбулентность в мениске может регулироваться в допустимых для процесса литья пределах или даже полностью устраниться. Двухкатушечные системы ЭМП, установленные и работающие на нескольких МНЛЗ, демонстрируют хорошие результаты и отсутствие проблем, связанных с турбулентностью мениска (таблица 9.11).

Таким образом, независимое управление скоростью перемешивания в кристаллизаторе и гибкость работы достигаются при использовании двухкатушечных УЭМП, которые регулируют скорость перемешивания в менисковой зоне, используя для этого магнитное поле либо переменного, либо постоянного тока.

Таблица 9.11

Двухкатушечные УЭМП, работающие в режиме торможения

Фирма, страна	Размеры ручья, мм	Число ручьев
Ispat Sidbes Inc.	120×120	Шесть
Contrecoeur Works	140×140	
Contrecoeur, Quebec, Canada	160×160	
QIT-FeretTitane Inc.	160×160	Четыре
Tracy, Quebec, Canada	130×130	
	120×120	

Окончание таблицы 9.11

Chaparral Steel Co. Midlothian, Tx, USA	165×165	Четыре
Bar Technologies Inc. Johnstown, PA, USA	172×172	Пять
Coros	120×120	
Scunthorpe Steel works, UK	140×140	Восемь
	180×180	
CSC Ltd.		
Warren, OH, USA	Ø 269	Три

В начале 1980-х годов ASEA и «Kawasaki Steel» начали разработку технологии электромагнитного торможения с использованием статического магнитного поля. Был разработан метод EMBR (электромагнитное торможение). В системе EMBR потоки стали в кристаллизаторе тормозятся за счет приложения статического магнитного поля поперек кристаллизатора перпендикулярно к направлению разливки. Потоки стали индуцируют напряжение, и в результате в жидкой стали возникают электрические токи. Такие токи вместе с магнитным полем создают тормозящую силу, противоположную направлению движения потока стали. Чем выше скорость потока стали, тем больше тормозящее усилие. Снижение скорости стали и ее турбулентности приводит к таким положительным эффектам, как повышение чистоты непрерывнолитого сляба, снижение доли брака и возможность повышения скорости разливки. Потоки в кристаллизаторе при использовании и отсутствии EMBR приведены на рисунке 9.12.

Торможение струи стали из погружаемого стакана уменьшает на 50 % глубину ее проникновения в область кристаллизующегося сляба. Сокращение глубины проникновения струи приводит к улучшению выделения неметаллических включений в области мениска.

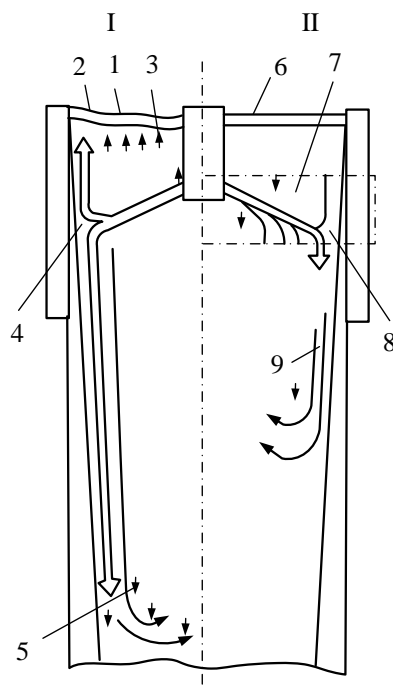


Рис. 9.12. Поток в кристаллизаторах без EMBR (I) и при его использовании (II): 1 – мениск в возмущенном состоянии; 2 – тонкая шлаковая пленка; 3 – вихри; 4 – точка столкновения; 5 – включения; 6 – успокоенный и более горячий мениск; 7 – область возникновения торможения; 8 – отсутствие столкновения; 9 – глубина с незначительным проникновением струи

Эффект торможения и соответствующее уменьшение скорости потоков стали обуславливают снижение уровня турбулентности на мениске, что позволяет добиться меньшего затягивания шлака. Оптимальное распределение потока металла приводит к значительному повышению качества слябов. Особенно важна возможность разливки при высоких скоростях, так как удается избежать повреждений поверхности и внутреннего качества слитков, вызванных высокими скоростями разливки. Установки EMBR первого поколения установлены на заводах «Kawasaki Steel Corp.», «Mizushima и Chiba Works», «Sumitomo Metal Industries», «Kashima Works» и «Nippon Steel Corp.», «Nagoya Works».

Фирма «Nippon Steel» (Япония) разработала новую технику электромагнитного торможения стали в кристаллизаторе (EMBR) второго поколения. В системе торможения первого поколения силовые линии постоянного магнитного поля пересекают часть широкой грани кристаллизатора (рисунок 6.13), однако такой тип электромагнитного поля все же недостаточно эффективен для управления формой потока в кристаллизаторе.

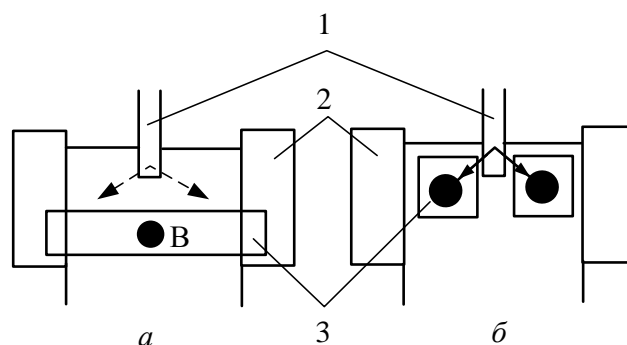


Рис. 9.13. Схемы нового (а) и старого (б) типа электромагнитного торможения стали в кристаллизаторе МНЛЗ: В – плотность магнитного потока; 1 – погружной стакан; 2 – кристаллизатор; 3 – магнитное поле

Электромагнитное торможение нового типа предусматривает создание постоянного магнитного поля, перекрывающего все поперечное сечение кристаллизатора (рис. 9.13, а). При этом поле действует на всю жидкую сталь в кристаллизаторе.

Установками EMBR второго поколения были оборудованы МНЛЗ фирм «Sollak», «Dunkerque Works» (Франция), «Hoogovens» (Голландия) и «Preussag» (Германия).

Фирма «Hoogovens» успешно применила электромагнитное торможение на обычной установке с криволинейным кристаллизатором для сведения к минимуму количества точечных дефектов стали без фаз внедрения. При получении слябов шириной более 1400 мм количество дефектов уменьшилось на 37 %, при получении слябов шириной менее 1400 мм применение электромагнитного торможения способствовало уменьшению количества дефектов, связанных с раковинами, на 75 %.

На этой фирме поток металла в мениске определяли с помощью погруженного в сталь огнеупорного цилиндра. Скорость металла находили как функцию от воздействующей на цилиндр силы; прибор был предварительно откалиброван на водяной модели. На рисунке 9.14 приведена скорость потока на расстоянии 350 мм от стакана для подачи металла под уровень при разливке в слябы шириной 2100 мм со скоростью 1,3 м/мин. Было отмечено снижение общего уровня скорости и колебаний скорости при работе EMBR.

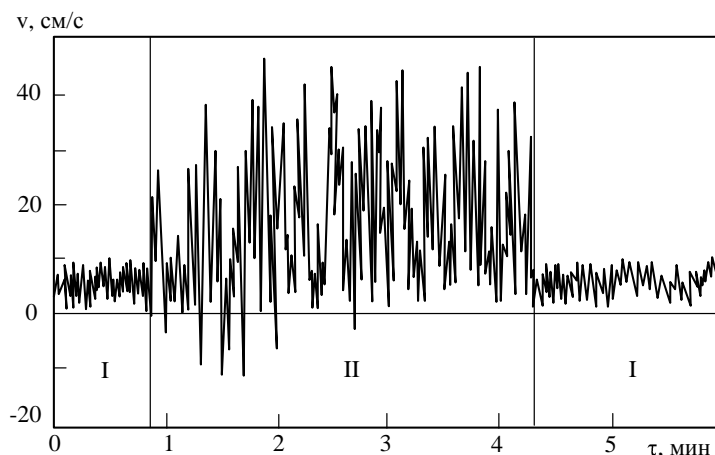


Рис. 9.14. Скорость потока металла (v) под мениском при включенной (I) и выключенной (II) EMBR

При разливке с большой производительностью в узкой части кристаллизатора возникает стоячая волна. При обычных скоростях разливки ее высота составляет 20 – 30 мм. При разливке тонких слябов она может достигать 50 мм. Высоту волны измеряли погружением в сталь тонкого листа из нержавеющей стали. Лист расплавляется в соответствии с уровнем металла. При разливке слябов шириной 2100 мм уровень волны составляет 20 – 25 мм и может быть уменьшен практически до нуля при использовании EMBR.

Уменьшение турбулентности и стоячих волн значительно уменьшает риск захвата защитного шлакового слоя. Большое количество рулонов было проверено на стане холодной прокатки № 2. Проверяли качество низко- и сверхнизкоуглеродистой стали визуально. Общее уменьшение выбраковки при применении EMBR составило 42 %.

Из 19 действующих установок EMBR 12 работают в Японии. При отливке тонких слябов к процессу разливки предъявляют повышенные требования. Повышенная в два-четыре раза по сравнению с обычными слябами скорость разливки вызывает повышенную турбулентность и затягивание шлака. Признание этого обстоятельства привело к установке оборудования EMBR практически на всех тонкослябовых МНЛЗ: на семи тонкослябовых МНЛЗ США, двух в Корее, двух в Таиланде, по одной в Чехии и Голландии.

Для получения оптимальной установки EMBR должны быть выдержаны определенные критерии. С помощью данных об эксплуатации и соответствующих расчетов потока выделены следующие критерии оптимизации установки:

- скорость металла в зоне мениска должна быть в оптимальном рабочем диапазоне с целью избежания раковин (скорость мала) и захва-

та шлака с поверхности (скорость велика);

- скорость движения потока металла вниз не должна превышать скорость разливки с целью уменьшения количества включений;

- низкочастотные колебания должны подавляться с целью уменьшения захвата шлака.

EMBR особенно эффективно при разливке сталей с повышенными требованиями по чистоте, таких как ULS (супернизкоуглеродистая) или IF, т.е. сталей для глубокой вытяжки. При этом очень важно уменьшить количество включений, попадающих в сталь при разных обстоятельствах (при замене ковшей и т.д.), в том числе (что очень важно) уменьшить их захват из защитного слоя шлака в кристаллизаторе. Для листовых сортов стали (особенно для перитектических сортов) увеличение чистоты и меньшая вероятность образования трещин имеют особое значение.

Нет никаких сомнений, что технология EMBR в ближайшем будущем докажет (в еще большей степени) свою полезность при производстве высокосортной листовой стали и тонких слябов. EMBR очень эффективны при разливке особочистых сталей при высоких скоростях разливки. В 1989 г. на заводе «Sandvik» (Швеция) установлены SEMS и FEMS на существующих трех ручьях МНЛЗ в блюмы сечением 265×365 и 265×265 мм. Разливается углеродистая, легированная нержавеющей сталь; масса плавки 75 т.

Линейные SEMS установлены на роликовом сегменте за валками из нержавеющей стали на 0,5 м ниже кристаллизатора. Для перемешивания жидкой стали используются токи низкой частоты, не требующие большого расхода энергии. SEMS смонтирована на тележке и может быть отодвинута, если в ней нет необходимости, при установке затравки, поломках и т.д. В зоне окончательного затвердевания установлено низкочастотное роторное FEMS на расстоянии 13,5 м от мениска. Это положение установки EMS выбрано для разливки стали в блюмы сечением 265×365 мм при скорости 0,8 м/мин.

На заводе «Sandvik» из этих блюмов производят полосу из углеродистой стали состава, %: С 0,75, Cr 0,10, Si 0,222, S < 0,025, P < 0,015. При перегреве стали на 30 – 400 °С доля равноосных кристаллов в отлитом блюме находится на уровне 40 – 60 %, тогда как без EMS она близка к нулю.

Показатель максимальной сегрегации углерода для блюмов сечением 265×365 мм из стали с 0,75 % С был уменьшен с 1,68 до 1,38 при применении SEMS и до 1,29 с применением SEMS и FEMS; для тех же блюмов из стали с 1 % С применение SEMS и FEMS позволило умень-

шить этот показатель до 1,25 – 1,3. В блюмах из сталей аустенитного и ферритного классов рыхлость в центральной части уменьшается; оптимальная плотность центральной части достигается при степени обжата 3,6.

Наряду с традиционными подходами к изучению влияния электромагнитного воздействия на кристаллизующийся металл изыскиваются и новые пути и приемы использования этого воздействия (в основном в Японии).

Разрабатываются способы регулирования начальной стадии кристаллизации при непрерывной разливке приложением к кристаллизатору переменного магнитного поля. Если в кристаллизаторе, окруженном электрической обмоткой, подобной обмотке электромагнита, изменяется положение зеркала электропроводящей жидкой стали, то изменяется в конечном счете резонансная частота электрического тока в цепи высокочастотного источника электропитания. Контролируя эту частоту, поддерживают требуемый уровень стали в кристаллизаторе. Используя катушку оптимальной конструкции, выявленной в ходе экспериментов на легкоплавком металле, провели эксперименты по разливке стали. При изменении уровня металла на 100 мм зарегистрировали изменение частоты на 200 Гц, что, по мнению авторов, вполне достаточно для реализации регулирования уровня на начальной стадии разливки [102].

Как было показано, для смазывания внутренней поверхности кристаллизатора при непрерывной разливке стали необходимы шлакообразующая смесь и качание кристаллизатора. Если в зоне контакта затвердевшей оболочки слитка с кристаллизатором возникнет локальная нехватка смазки, то возможны разрыв оболочки из-за действия сил трения и истечение жидкого металла. Следовательно, важным условием нормальной разливки является присутствие шлакообразующей смеси в зазоре по всему периметру кристаллизатора.

К настоящему времени механизм затекания шлакообразующей смеси в зазор между стенкой кристаллизатора и слитком изучен в многочисленных исследованиях. Пришли к заключению, что электромагнитные силы способствуют расширению канала для затекания шлакообразующей смеси в зазор между слитком и стенкой и тем самым стабилизируют процесс разливки. На основе аналитического и экспериментального исследований убедились в возможности расширить канал для шлакообразующей смеси путем наложения прерывистого высокочувствительного магнитного поля. Используя эти результаты, выявили потенциальную возможность применить прерывистое высокочастотное магнитное поле взамен качания кристаллизатора и обеспечить с его помощью периодическое затекание и вытекание шлакообразующей смеси.

В результате пришли к выводу о возможности заменить функцию качания кристаллизатора наложением прерывистого высокочастотного магнитного поля.

С наложением прерывистого высокочастотного магнитного поля взамен качания кристаллизатора пока что оказалась возможна электромагнитная разливка олова. Этот процесс назвали электромагнитной разливкой без качания кристаллизатора (MOLEMC).

Фирмой «Kobe Steel» была поставлена задача разработки способа разливки в электромагнитном поле с использованием составного кристаллизатора и высокочастотного магнитного поля.

Сталь с 0,12 % С в квадратный кристаллизатор со стороной 150 мм разливали с использованием флюса при частоте источника электропитания 29 кГц и максимальной мощности 200 кВт. В верхней части кристаллизатора были расположены индукторы: пятивитковый высотой 100 и четырехвитковый высотой 40 мм.

При разливке без электромагнитного воздействия на поверхности слитка были обнаружены глубокие следы качания кристаллизатора, тогда как при наложении магнитного поля поверхность слитка была гораздо более гладкой.

При отсутствии электромагнитных сил средняя высота неровностей поверхности составила 0,6 – 0,7, достигая в отдельных случаях 1,3 мм. При разливке со скоростью 0,7 м/мин и приложении поля более 150 кВт шероховатость поверхности слитка значительно уменьшилась, средняя высота неровностей составила 0,1 – 0,3 мм.

Экспериментально показано, что при разливке без наложения магнитного поля затвердевание начинается непосредственно от мениска. При наложении поля образование корочки начинается на некотором расстоянии от мениска, при этом толщина корочки оказывается меньше. Установлена также общая тенденция уменьшения толщины корочки с увеличением подведенной мощности. Вероятно, это связано, во-первых, с повышением температуры жидкой стали вследствие термического эффекта электромагнитного поля и, во-вторых, с замедлением процесса кристаллизации из-за потоков металла, возбуждаемых электромагнитными силами.

Спустя три секунды после начала затвердевания разница в толщине корочки уменьшается, сближаются величины, полученные при наложении и без наложения магнитного поля.

Кроме того, установлено, что при разливке без наложения электромагнитного поля сравнительно часто наблюдаются завороты корочки, тогда как при приложении поля частота их образования значительно снижается, а при мощности 80 кВт завороты полностью отсутствуют.

Глава 10. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

10.1. Температурно-скоростной режим разливки

Правильный выбор технологических параметров разливки (температуры стали, метода ввода ее в кристаллизатор, скорости вытягивания заготовки и др.) способствует улучшению качества металла, повышению производительности МНЛЗ и, в итоге, получению слитков без дефектов. Эти показатели зависят также от конструкции и размеров технологических узлов (устройств для подачи металла в кристаллизатор, опорных устройств зоны вторичной охлаждения и др.). Одним из важнейших параметров непрерывной разливки стали является температурный режим процесса, нарушение которого служит причиной аварий на установке, аварийного выпуска металла или массового брака слитков.

Низкая температура разливки приводит к возникновению плен, заворотов, поясов, местных скоплений шлаковых включений (из-за ухудшения условий их всплывания), вызывает прихватывание пробки к седлу стакана в сталеразливочном ковше и образование настелей в канале стакана. При прожигании стакана кислородом резко ухудшается организация струи, забрызгиваются металлом стенки кристаллизатора.

Слишком высокая температура разливки способствует разрушению трубок и пробок стопоров, размывке огнеупоров, что вызывает необходимость регулировать расход стали стопором, ухудшает организацию струи. Кроме того, перегрев приводит к вторичному окислению, загрязненности размываемыми огнеупорами, пораженности слитка горячими трещинами и ужимами, ограничивает скорость вытягивания заготовок. Оптимальный перегрев поступающего в кристаллизатор металла над температурой ликвидуса данной марки стали составляет 10 – 20 град. Для компенсации тепловых потерь в процессе непрерывной разливки температура металла в сталеразливочном ковше должна быть на 30 – 60 град. выше, чем при разливке в изложницы. После обработки аргоном или вакуумом сталь можно разливать при более низкой температуре.

При выборе температурного режима процесса необходимо учитывать величину тепловых потерь на всех этапах от выпуска до разливки в каждом конкретном случае. Общие рекомендации, способствующие стабилизации и совершенствованию режима, заключаются в следующем: время выпуска металла необходимо максимально сокращать; по-

тери тепла в сталеразливочном ковше должны быть сведены к минимуму: Этого можно достичь, например, в результате применения малоизношенных ковшей (масса футеровки больше 15 – 18 % от массы металла в ковше); нагрева сталеразливочного и промежуточного ковшей перед разливкой.

Наличие стопоров, как правило, ограничивает возможность подгрева до высоких температур сталеразливочных и промежуточных ковшей. Этого недостатка лишены сталеразливочные ковши, снабженные скользящими затворами, обеспечивающие и более равномерную подачу металла в промежуточный ковш. Такие ковши получают все большее распространение в практике непрерывной разливки стали.

Перед разливкой футеровку промежуточных ковшей нагревают до температуры 1373 – 1473 К более 2,5 ч. На большинстве МНЛЗ промежуточные ковши в процессе разливки не обогревают и тепловой режим их работы определяется температурой поступающего из сталеразливочного ковша металла. Стабилизации температурного режима разливки достигают при непрерывном нагреве металла в промежуточном ковше при помощи мощных горелок или электрических графитовых элементов (встроенных в крышку ковша). Эти способы нагрева обеспечивают надежное регулирование режима в промежуточном ковше и позволяют снизить температуру стали при выпуске из печи на 10 – 30 град. Однако дополнительные газовые или электрические коммуникации загромождают разливочную площадку.

Скорость вытягивания непрерывнолитых заготовок является параметром, определяющим производительность МНЛЗ и качество заготовок. Заданная скорость определяет также температуру металла, подаваемого на разливку, режимы возвратно-поступательного движения кристаллизатора и охлаждения слитка. С увеличением скорости прямо пропорционально возрастает производительность установок. Однако при увеличении скорости разливки растет протяженность жидкой лунки, уменьшается угол смыкания фронтов кристаллизации, что может привести к увеличению осевой пористости. Кроме того, при высоких скоростях вытягивания заготовок и тонкой оболочке слитка, образующейся в кристаллизаторе, увеличивается склонность к образованию продольных и поперечных трещин. Скорость вытягивания заготовок определяет также технико-экономические показатели работы МНЛЗ. С повышением скорости, на которую рассчитана установка, масса технологического оборудования увеличивается. Уменьшение массы оборудования происходит лишь при такой скорости разливки, при которой плавку заданной массы можно разлить на меньшем числе ручьев.

В современных кислородно-конвертерных цехах с МНЛЗ, где ши-

роко применяют разливку методом «плавка на плавку», скорость вытягивания заготовок разных сечений определяется ритмом выдачи плавок из конвертеров. Таким образом, для каждого конкретного случая (заданных сортамента, производительности, вместимости сталеплавильных агрегатов, цикла подачи плавок и т.п.) существует определенный диапазон оптимальных скоростей вытягивания заготовок в зависимости от сечения слитка.

Для достижения максимальных скоростей вытягивания заготовок необходимо определить зависимость предельно допустимой скорости вытягивания от сечения слитка и основных технологических и конструктивных параметров МНЛЗ. Предельно допустимой скоростью вытягивания заготовок называют такую скорость, превышение которой приводит к ухудшению качества слитка или резкому увеличению числа прорывов металла под кристаллизатором. Факторы, лимитирующие скорость вытягивания заготовок и определяющие параметры разливки: образование поперечных трещин на поверхности слитка, вызываемых силами трения между оболочкой слитка и стенками кристаллизатора (длина кристаллизатора и коэффициент трения); образование продольных трещин в оболочке слитка до выхода из кристаллизатора, вызываемых затрудненной усадкой (абсолютный размер граней, соотношение размеров граней, соотношение размеров граней, коэффициент трения, профиль рабочих стенок); образование продольных трещин после выхода из кристаллизатора, вызываемых прогибом граней под действием ферро-статического давления (длина кристаллизатора, абсолютный размер и соотношение размеров граней, конструкция поддерживающих устройств); систематические обрывы оболочки слитка при движении кристаллизатора вверх (закон, частота и амплитуда возвратно-поступательного движения кристаллизатора, коэффициент трения, качество поверхности слитка).

Образование трещин и прорывы металла под кристаллизатором указывают на то, что предельная скорость вытягивания заготовки примерно пропорциональна квадрату толщины оболочки в опасном сечении. Кроме толщины оболочки, на предельную скорость вытягивания заготовки влияет активная длина кристаллизатора. Однако только для слитков малого сечения имеется оптимальная длина кристаллизатора, при которой достигается максимальная скорость вытягивания заготовки. Для слитков больших сечений длина кристаллизатора не оказывает существенного влияния на скорость вытягивания заготовлен. В основу зависимости скорости вытягивания заготовки от сечения слитка было положено уравнение Сэвиджа для определения производительности МНЛЗ, удобное для практических расчетов: $Q = AP$, где Q – часовая

производительность на один ручей, т/ч; P – периметр слитка, м; A – коэффициент пропорциональности.

Преобразуем это выражение. Поскольку $Q = V\delta\gamma v$; $P = 2(V + \delta)$; $\beta = V/\delta$, линейная скорость вытягивания составит

$$v = \frac{2A}{\gamma V} \frac{1 + \beta}{1 + \beta} = A \frac{1 + \beta}{V}, \quad (10.1)$$

где V – ширина слитка, м;

δ – толщина слитка, м;

γ – плотность жидкой стали, кг/м³.

Зависимость массовой скорости вытягивания заготовки на один ручей от сечения слитка и глубины жидкой лунки определяется из соотношений $Q = V\delta\gamma v$ и $L = K\delta^2 v$, где K – коэффициент полного затвердевания слитка, равный 5,67 с/м². Тогда

$$Q = \frac{VL}{43,5\delta}. \quad (10.2)$$

На рис. 10.1 эта зависимость представлена графически.

Здесь можно выделить области использования МНЛЗ различного типа. Практика и расчеты показывают, что применение МНЛЗ с базовым радиусом менее 8 м (металлургическая длина 12,5 м) приводит к ухудшению качества слитка вследствие более сильного, развития одно-сторонней точечной ликвации и близкого залегания этой зоны к поверхности слитка. Увеличение радиуса более 12 м (металлургическая длина 19 м) невозможно в связи с особенностями конструкции.

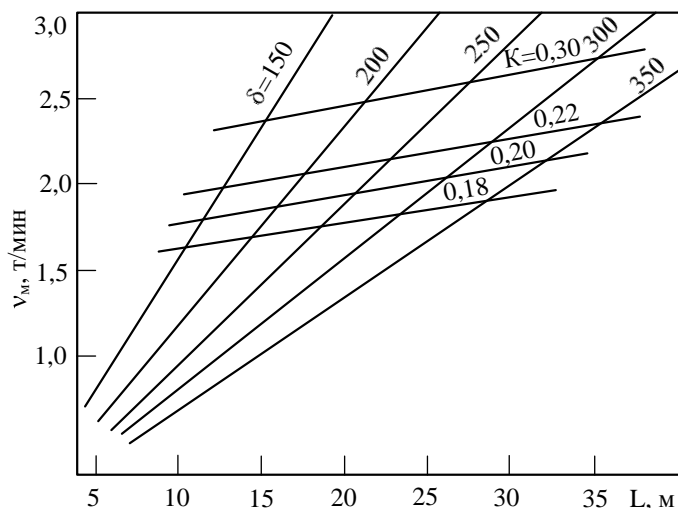


Рис. 10.1. Зависимость массовой скорости вытягивания заготовки от сечения слитка и глубины жидкой лунки

Если нанести на график линии ограничения производительности по допустимой линейной скорости вытягивания заготовки данного сечения, то для каждого значения глубины лунки существует оптимальная толщина слитка, при которой производительность максимальна. Так, при $K = 0,18$ для радиальной МНЛЗ с радиусом 12 м оптимальной является толщина слитка 0,25 м. При этом затвердевание слитка заканчивается до его выпрямления. Массовая скорость на 1 м ширины сляба составит 29,0 кг/(с м). Отливка в этих же условиях слитка толщиной 0,30 м понизит массовую скорость до 24,0 кг/(с м). Для других значений K минимальную ширину слитка при заданных параметрах можно определить следующим образом

$$B = Q/K\gamma \left[L/43,5Q + 1 \right]. \quad (10.3)$$

На рис. 10.2 представлена зависимость размерного сортамента сляба от производительности для двухручьевой МНЛЗ. Уменьшение ширины приведет к снижению производительности и увеличению цикла разливки.

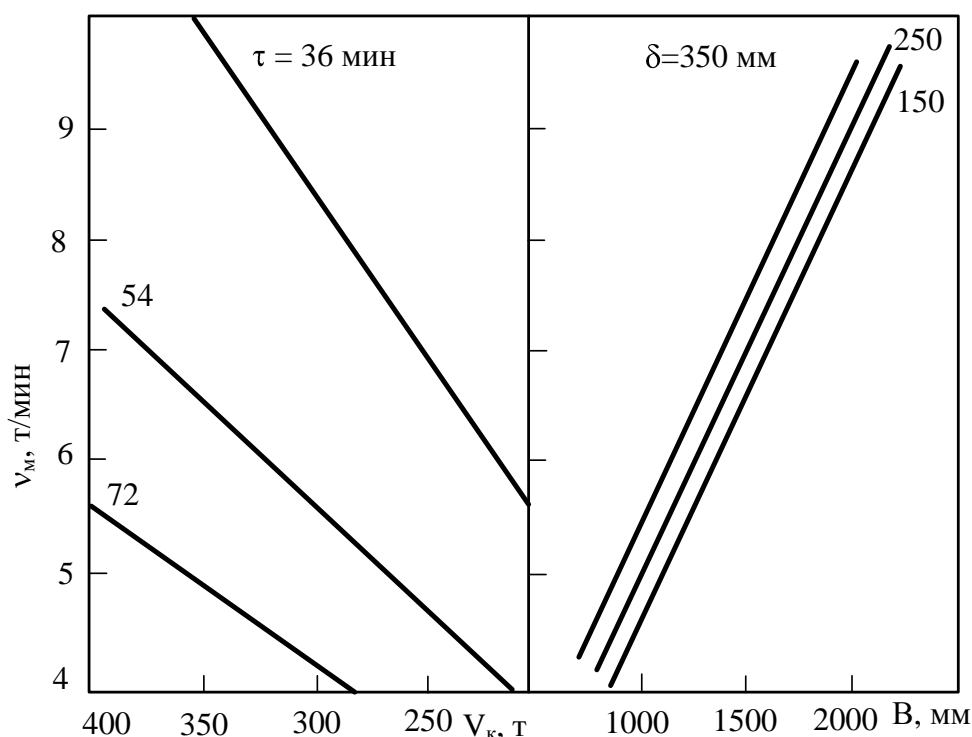


Рис. 10.2. Зависимость размерного сортамента сляба от производительности МНЛЗ x_m при заданных значениях вместимости ковша V_K и времени разливки

В случае применения МНЛЗ криволинейного типа из выражения (10.3) можно определить минимальный размер слитка, который можно разливать без деформации до момента полного затвердевания. Приведенные выше зависимости позволяют определить среднюю скорость разливки.

Положенное в основу постоянство массовой скорости и глубины жидкой лунки значительно облегчает выбор и стабилизацию технологических параметров разливки – температуры металла и режима вторичного охлаждения. Остается постоянным также диаметр сталеразливочных стаканов промежуточного ковша независимо от сечения слитка.

10.2. Условия подвода жидкого металла в кристаллизатор

Одними из основных факторов, определяющих качество непрерывных слитков, являются условия подвода металла в кристаллизатор. МНЛЗ, т.е. конструкция погружного стакана, размер и форма сечений выходных отверстий, угол их наклона и т.д. Различные погружные стаканы представлены на рис. 10.3. Подвод металла в кристаллизатор через дополнительные стаканы с воронкой («безнапорная» разливка) позволил уменьшить глубину проникновения циркуляционных потоков, снизить эжекцию воздуха и получить непрерывный слиток высокого качества.

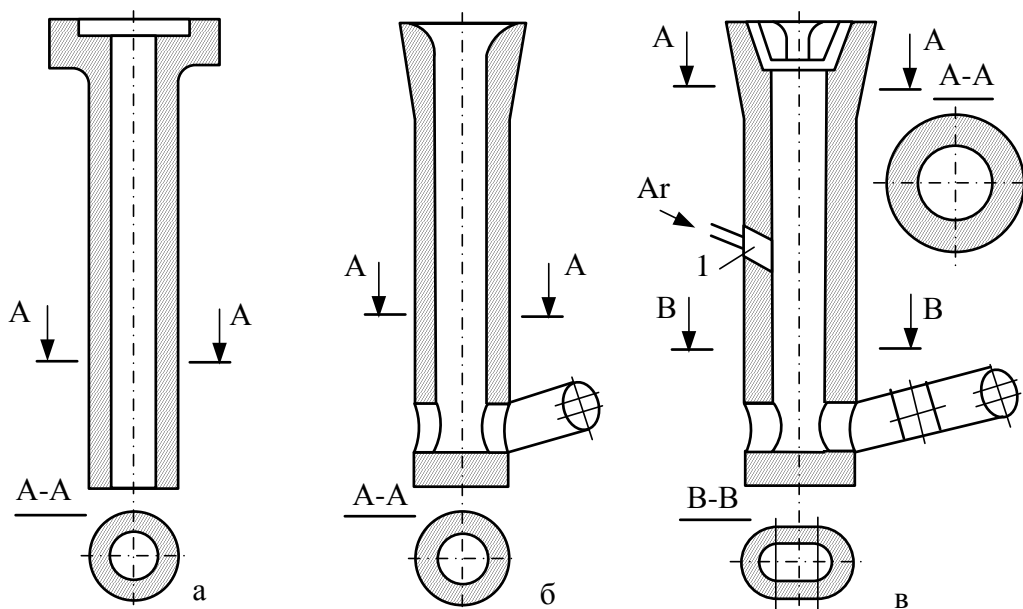


Рис. 10.3. Погружные стаканы: а – круглый (крепят стружи при помощи фланцев); б – круглый (устанавливают внутри в гнездовой кирпич); в – овальный (устанавливают внутри в гнездовой кирпич); 1 – пористый блок

Для улучшения структуры слитка и более эффективной защиты струи и зеркала металла от охлаждения и вторичного окисления применяют (в большей степени для отливки слябовых заготовок) различные глухонные стаканы. Подвод металла затопленными струями под углом 7 – 12 градусов от горизонта вверх обеспечивает поступление горячего металла в район зеркала металла. Это позволяет применять для защиты зеркала металла в кристаллизаторе от охлаждения и вторичного окисления экзотермические и теплоизолирующие шлаковые смеси без затягивания шпака внутрь слитка. Подвод металла затопленными струями под углом к зеркалу металла исключает воздействие струи и связанных с ней циркуляционных потоков на затвердевшую корочку слитка, что способствует получению равномерного фронта кристаллизации, уменьшает глубину жидкой фазы, снижает количество горячих продольных трещин. Подача металла через боковые отверстия либо параллельно поверхности зеркала металла, либо под углом 15 и 65 градусов к вертикальной оси погружного стакана не является эффективной, так как в первом случае происходит затягивание шпака, во втором случае захлаживаются боковые грани слитка (при разливке металла в широкие кристаллизаторы) из-за недостатка тепла. Наиболее эффективный угол наклона 15 градусов. Погружные стаканы не должны иметь на своей поверхности трещин и их пористость должна быть минимальной, так как в этом случае происходит подсос воздуха, что приводит к вторичному окислению металла при разливке на любых видах МНЛЗ. За счет эжекции воздуха в жидкий металл, находящийся в кристаллизаторе, изменяется направление циркуляционных потоков, что вызывает захват неметаллических включений растущей корочкой металла. Применительно к условиям отливки широких слябов были получены хорошие результаты, когда оси боковых выходных отверстий стакана были наклонены вниз от горизонтали. При такой системе подвода металла взвешенные неметаллические включения равномерно доставляются циркуляционными потоками к жидкому слою шпака на зеркале металла, где и абсорбируются. В этом случае, поднимаясь вверх, потоки горячего металла направляются в верхнюю часть кристаллизатора, задерживают его охлаждение в этой области и уменьшают захват неметаллических включений ниже поверхности раздела шлак–жидкий металл. Следовательно, условия подвода металла в кристаллизатор МНЛЗ (главным образом, конструкция погружного стакана) оказывают влияние на процесс формирования оболочки слитка в кристаллизаторе, позволяют в определенной степени организовать требуемый характер потоков металла в слитке.

10.3. Защита металла от вторичного окисления и тепловых потерь на пути в сталеразливочный ковш-кристаллизатор

Некоторые особенности МНЛЗ создают условия для развития нежелательных процессов вторичного окисления. Степень окисления струи металла в процессе разливки зависит от площади и продолжительности, контакта с кислородом воздуха. Если представить струю металла в виде цилиндра длиной L и диаметром D равным диаметру канала стакана, то поверхность струи будет равна $S = \pi DL$, а масса жидкого металла составит $m = \pi D^2 L \gamma / 4$, откуда удельная поверхность контакта: $S_0 = 4/\gamma D$. Удельная поверхность контакта зависит от диаметра струи и изменяется по закону гиперболы. Сравним удельную поверхность контакта (соприкосновения) струи при непрерывной разливке и разливке в изложницы, при этом учитывая, что диаметр стакана ковша при сифонной разливке легированной стали больше, чем диаметр стакана промежуточного ковша при непрерывной разливке. Результаты приведены ниже:

	$D, \text{ м}$	$S_0 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^2/\text{кг}$
Непрерывная разливка	0,020	28,5
	0,024	23,7
	0,026	21,8
	0,028	20,3
Сифонная разливка	0,040	14,25
	0,050	11,4
	0,060	9,52

Видно, что при уменьшении диаметра струи имеет место резкое увеличение удельных поверхностей контакта металла с воздухом. Удельная поверхность контакта струи жидкого металла с воздухом при непрерывной разливке в среднем в два раза больше, чем при обычной разливке в изложницы. Следовательно, окисление и охлаждение жидкого металла при непрерывной разливке будут интенсивнее по сравнению с обычной разливкой. Продолжительность контакта зависит от протяженности пути струи в атмосфере и от скорости истечения струи: $Z = L/v_0$, где v_0 – скорость истечения струи, м/с. Скорость истечения струи определяется массовым расходом жидкого металла: $v_0 = 4g/\pi D^2 \gamma$. Получим формулу для расчета продолжительности контакта струи металла с атмосферой: $Z = L \pi D^2 \gamma / 4g$. Продолжительность контакта струи с окружающей атмосферой τ_k , определенная для вышеупомянутых способов

разливки при $L = 0,40$ м для различных массовых расходов стали v_m , приведена ниже:

	$v_m \cdot 10^3$, кг/мин	$\tau_k \cdot 10^{-5}$, с
Непрерывная разливка	0,5	2,92
	0,7	3,00
	0,8	3,08
	0,09	3,2
Сифонная разливка	2,32	2,53
	5,32	2,5

Отсюда следует, что продолжительность контакта струи с атмосферой зависит в основном от протяженности пути струи и мало зависит от способа разливки.

Следовательно, внепечная обработка по улучшению качества металла может оказаться малоэффективной, если отсутствует защита струи металла от вторичного окисления на пути сталеразливочный ковш – кристаллизатор. Особо остро эта проблема ставится в последнее время, так как постоянно увеличивается объем производства непрерывнолитых заготовок ответственного назначения, при производстве которых используются такие легкоокисляющие и дорогостоящие элементы как алюминий, титан, кальций, барий, цирконий, лантан и др.

В последнее время разработаны и внедрены в производство три способа защиты струи металла от вторичного окисления на пути сталеразливочный ковш – кристаллизатор: инертным газом, при помощи огнеупорной трубы и комбинированный способ.

Защита инертным газом позволяет создавать газовый экран вокруг струи металла на участке сталеразливочный ковш – промежуточный ковш. Устройство (рис. 10.4) состоит из кольцевого распределительного коллектора 1, образованного внутренней 3 и наружной стенками 2 и крышкой 4.

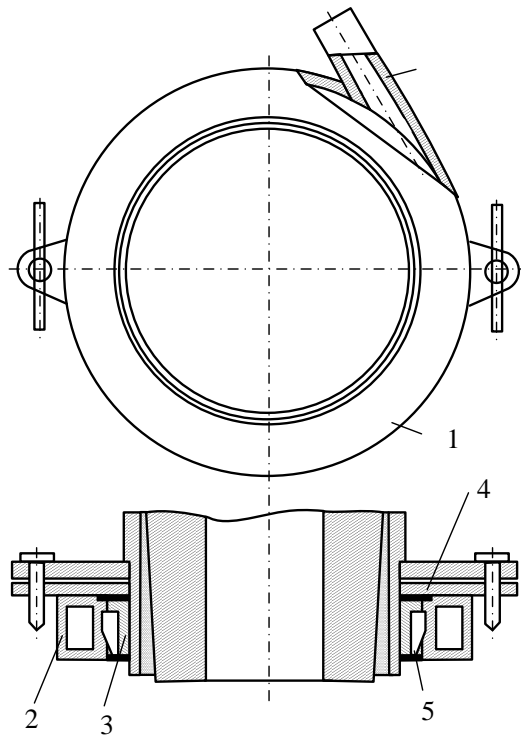


Рис. 10.4. Устройство для защиты струи металла инертным газом

В нижней части коллектора установлено сопло 5. Устройство работает следующим образом. После открытия шиберного затвора 6 в устройство под давлением 0,4 – 0,6 МПа подают через подводящий патрубок аргон, который поступает в коллектор 1, а затем истекает через сопло 5 равномерно в виде сплошной кольцевой «рубашки» вокруг жидкого металла, предохраняя его от контакта с атмосферой. Высокая скорость истечения аргона (30 м/с) позволяет создать сплошной поток газа практически по всей высоте падения струи жидкого металла, т.е. нижнего торца стакана-коллектора шиберного затвора до зеркала металла в промежуточном ковше. Расход аргона составляет $(1,8–2,2) \times 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$. Устройство крепится к коллектородержателю шиберного затвора сталеразливочного ковша при помощи клиньев в отделении подготовки сталеразливочных ковшей.

Для другого способа защиты используют огнеупорную трубу 1 (рис. 10.5), стыкующуюся со стаканом-коллектором 2 шиберного затвора. Длина огнеупорной трубы зависит от расстояния между нижним срезом стакана-коллектора и верхним уровнем промежуточного ковша, внутренний диаметр огнеупорной трубы в 2 – 2,5 раза больше внутреннего диаметра стакана-коллектора. Основные компоненты изготавливаемых труб – шамот, тонкомолотый кремний или ферросилиций, огнеупорная глина и углеродистое связующее вещество. Такие трубы перед

установкой в рабочее положение нагревают до 333 К, что позволяет разливать 350 т жидкого металла. Для комбинированного способа защиты струи используют шамотографитовую трубу (рис.10.6), стыкующуюся со стаканом-коллектором. Кожух коллектородержателя в нижней части имеет кольцевой глухо донный паз 7 глубиной 0,07 – 0,10 м от нижнего торца коллектородержателя. На определенном расстоянии (в зависимости от высоты буртика воронки трубы) от нижнего среза коллектородержателя расположен быстросъемник для подвода аргона. В этом случае часть аргона расходуется на защиту места стыковки от контакта с атмосферой, часть попадает во внутреннюю полость огнеупорной трубы и транспортируется в промежуточный ковш. В промежуточном ковше газ, выделяясь, рафинирует металл. Место стыковки погруженного стакана 1 и промежуточного ковша обдувают аргоном через специальное устройство (рис. 10.7).

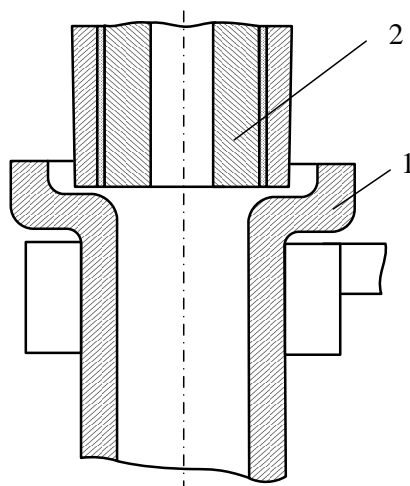


Рис. 10.5. Защита струи металла при помощи огнеупорной трубы

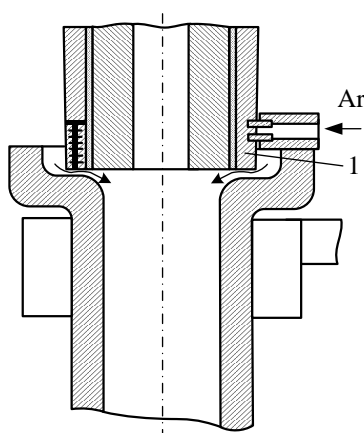


Рис. 10.6. Комбинированный способ защиты струи

После внепечной обработки металла сталеразливочный ковш подают на МНЛЗ при помощи крана, предварительно накрыв крышкой или специальными теплоизолирующими засыпками зеркало металла в сталеразливочном ковше. Потери тепла жидкой сталью после внепечной обработки минимальны, так как стенки сталеразливочного ковша хорошо прогреты и в месте контакта металла и огнеупора (например, шамота) температура металла составляет 1723 – 1728 К. В этом случае на аккумуляцию расходуется минимальное количество тепла, а потери тепла с зеркала металла в ковше блокируются крышкой или специальными теплоизолирующими засыпками. В этом случае на определенный период в сталеразливочном ковше температуру металла по высоте ковша можно считать постоянной. Абсолютное значение перепада между температурой струи на выходе из сталеразливочного и промежуточного ковшей (без защиты огнеупорной трубой или погружаемым стаканом) колеблется от 60 до 20 К. С учетом падения температуры струи 10 – 20 К, снижение температуры металла в промежуточном ковше в зависимости от нагрева футеровки и температуры разливаемого металла составляет 25 – 40 К.

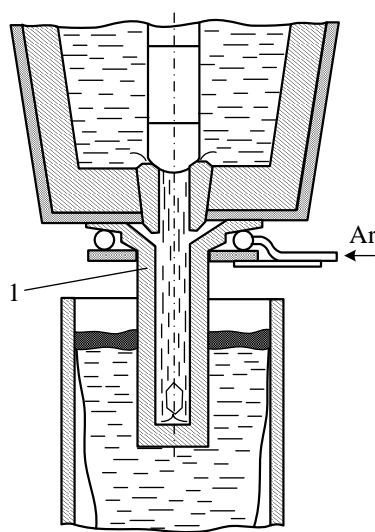


Рис. 10.7. Защита места стыковки стакана промежуточного ковша и погружного стакана

Значительный перепад температуры металла по высоте сталеразливочного ковша определяет характер изменения температуры металла в промежуточном ковше после слива первых порций металла.

Эти первые порции имеют самую низкую температуру, поскольку они наиболее охлаждены у стенок и днища сталеразливочного и промежуточного ковшей. Обычно через 15 – 25 мин после слива первых пор-

ций температура металла в промежуточном ковше постепенно повышается на 10 – 15 К, затем в течение 30 – 40 мин она остается практически постоянной и лишь в конце разливки она опять повышается на 5 – 15 К.

Такой характер изменения температуры металла в промежуточном ковше по ходу разливки находится в полном соответствии с распределением температуры по высоте сталеразливочного ковша. Снижение или повышение температуры металла в промежуточном ковше в конце разливки зависят в основном от толщины шлакового покрова и степени износа футеровки сталеразливочного ковша. На характер изменения температуры металла в промежуточном ковше по ходу разливки существенное влияние оказывают также температура стали перед выпуском и порядок ввода раскислителей металла в ковше. Таким образом, основное влияние на снижение температуры металла в промежуточном ковше оказывают степень нагрева футеровки перед разливкой и утепление зеркала металла в ковше.

10.4. Защита металла в кристаллизаторе

Жидкие смазки. При непрерывной разливке стали прорыв оболочки слитка в кристаллизаторе происходит на расстоянии $(5-40) \cdot 10^{-3}$ м от уровня металла и обусловлен сопротивлением вытягиванию. Беспрепятственное скольжение или разрыв оболочки слитка определяется соотношением силы трения F_T и сил, разрывающих оболочку F_p . При этом скольжение будет обеспечено при условии $F_T < F_p$, а разрыв оболочки – $F_T > F_p$

$$F_T = fNS_T \cos \alpha, \quad (10.4)$$

где f – коэффициент трения;

N – удельное давление;

S_T – поверхность скольжения;

α – угол, образуемый оболочкой и стенкой кристаллизатора.

Для случая разрыва оболочки слитка коэффициент трения определяется из выражения

$$f \geq \sigma_b S_k / NS_T \cos \alpha, \quad (10.5)$$

где σ_b – предел прочности оболочки;

S_k – площадь сечения оболочки в месте разрыва.

Для углеродистой стали коэффициент трения, вызывающий разрыв оболочки, составляет примерно 10 (при $\cos \alpha = 1$). Оболочка слитка удерживается в основном вследствие точечного прилипания оболочки к стенкам кристаллизатора.

Смазка стенок кристаллизатора при непрерывной разливке стали решает две основные задачи: предотвращает обрыв затвердевающей оболочки непрерывного слитка в его верхней части и защищает жидкую сталь в рабочей полости кристаллизатора от вторичного окисления. Назначение смазки – обеспечить стабилизацию процесса разливки и получить непрерывный слиток с хорошим качеством поверхности.

Жидкие смазки должны быть достаточно жидкоподвижны при температуре применения, однородны, иметь стабильные физико-химические свойства. Не допускается присутствие в смазке механических примесей и включений твердых частиц. В то же время смазка должна обладать определенной вязкостью и хорошим сцеплением с медными стенками кристаллизатора. Смазка или продукты ее сгорания создают тонкий промежуточный слой между металлом и стенками кристаллизатора, предотвращая налипание жидкой стали на стенки кристаллизатора и снижая коэффициент трения между стенками кристаллизатора и затвердевающей оболочкой непрерывного слитка. Особенно важным является уменьшение трения в верхней части кристаллизатора, где затвердевающая оболочка слитка имеет малую толщину, низкую прочность и пластичность. При использовании в качестве смазки твердых продуктов последние должны надежно изолировать поверхность жидкой стали в кристаллизаторе от окружающей атмосферы.

Смазки можно подразделить на следующие группы: масла растительные (твердые и жидкие) и минеральные (нефтяные); парафины твердые и жидкие (нефтяные), церезины, а также полупродукты на их основе; комбинированные и прочие жидкие смазки; графит и смеси на его основе.

Для защиты зеркала металла в кристаллизаторе используют жидкий парафин и газ пропан-бутан. Жидкий парафин подается самотеком, а газ – из магистрали через трубопровод и коллектор с диаметром отверстий $2 \cdot 10^{-3}$ м.

Расход жидкого парафина находится в пределах $(0,3-1,3) \cdot 10^{-3}$ кг/кг стали. Наилучшие результаты достигаются при расходе смазки $(0,7-0,8) \cdot 10^{-3}$ кг/кг стали. Подачу пропан-бутана осуществляют через специальную рамку, подводящую газ к узким граням и прилегающим участкам широких граней. Газ подают под давлением $4,9 - 9,81$ Н/см². При меньшем давлении происходит заметное ухудшение состояния поверхности стали в кристаллизаторе. При увеличении давления пропан-бутана более $9,81$ Н/см² сгорание основного объема газа происходит вне пределов рабочей полости кристаллизатора, в местах поступления газа наблюдается бурление металла. Расход пропан-бутана при оптимальном

давлении $4,9 - 7,45 \text{ Н/см}^2$ составляет $(0,8-1,0) \cdot 10^{-3} \text{ кг/кг}$ жидкой стали. При разливке стали, содержащей такие легкоплавкие элементы, как алюминий, титан, хром и другие, даже в восстановительной защитной атмосфере не удастся предотвратить интенсивное вторичное окисление. Наличие в защитной атмосфере, создаваемой сжиганием парафина и пропан-бутановой газовой смеси, $1 - 3 \%$ O_2 вполне достаточно для окисления указанных элементов. Наиболее широкое применение для непрерывной разливки стали нашли жидкие синтетические и твердые шлаковые смеси.

Синтетический шлак, наведенный в кристаллизаторе, выполняет несколько функций: он защищает металл от окисления и охлаждения при контакте с атмосферой, ассимилирует неметаллические включения. Кроме того, он обволакивает оболочку слитка тонкой пленкой, изолируя ее от кристаллизатора. Вследствие этого в верхней части кристаллизатора скорость отвода тепла уменьшается, выравнивается фронт затвердевания. Для обеспечения стабильных условий формирования поверхности непрерывного слитка шлак в процессе всей разливки должен быть достаточно жидким (температура плавления $1373 - 1623 \text{ К}$). Исходя из вязкости шлаков, можно применять шлак того или иного состава для процесса непрерывной разливки. Химический состав шлаков приведен в таблице 10.1. Как видно из таблицы 8.1, все три группы шлаков (силикатные, бессиликатные и занимающие промежуточное положение) имеют при температурах разливки низкую вязкость, их температура плавления лежит в пределах $1353 - 1553 \text{ К}$. Вязкость шлаков первой группы системы $\text{CaF}_2\text{-CaO-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ в интервале $1473 - 1823 \text{ К}$ не превышает $0,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$. При 1473 К наблюдается плавное возрастание вязкости вплоть до полного затвердевания шлакового расплава.

Таблица 10.1

Химический состав шлаков

Группа шлака	Условный номер	Массовая доля, %							
		CaF_2	CaO	SiO_2	Na_2O	Al_2O_2	TiO_2	Cr_2O_3	MgO
I	1	43,7	11,8	34,6	7,5	0,8	—	—	—
	2	35,0	25,2	31,5	4,6	1,2	—	—	—
II	3	32,8	20,7	1,48	2,7	26,1	14,0	—	—
	4	37,8	5,2	2,06	6,5	27,2	16,3	—	—
III	5	42,2	18,4	16,3	3,2	18,9	—	—	—
	6	28,8	23,9	18,1	5,2	9,7	20,9	4,8	1,4

Вязкость глиноземсодержащего силикатного шлакового расплава ниже 1623 К резко увеличивается, что связано с повышением темпера-

туры ликвидуса вследствие увеличения содержания тугоплавкой составляющей до 20 % Al_2O_3 . Выше 1623 К вязкость такого шлака почти не меняется. В силикатном глиноземсодержащем шлаке при помощи рентгеноструктурного анализа обнаруживают трикальцийалюминат $3CaAl_2O_3$, который уже при 1808 К выпадает в осадок в результате перитектического превращения. Это приводит к переходу шлака в гетерогенное состояние при высоких температурах и сужению интервала затвердевания.

Шлак 6 соответствует силикатному шлаку, разбавленному добавками TiO_2 , Al_2O_3 , Cr_2O_3 , MgO . Добавка в силикатный шлак глинозема и диоксида титана повышает вязкость при низких температурах и сужает интервал затвердевания. Добавки Na_2O и B_2O_3 понижают вязкость. Бессиликатные шлаки 3 и 4 с высоким содержанием CaF_2 и Na_2O имеют температуру плавления соответственно 1523 и 1553 К, однако их температура начала затвердевания заметно выше, чем силикатных шлаков и лежит в пределах 1513 – 1603 К.

Таким образом, силикатные шлаки более легкоплавки и имеют широкий интервал затвердевания, т.е. изменяют свою вязкость в пределах возможного колебания температуры. Шлак должен хорошо растворять включения, образующиеся или в сплывающие, на поверхность металла в кристаллизаторе. Это зависит от физико-химических свойств шлака, в частности, от поверхностных явлений, происходящих на границе раздела металл–шлак. Из рисунка 10.8 видно, что величина поверхностного натяжения шлаков (1 – 6) составляет 0,20 – 0,27 Н/м², что обусловлено высоким содержанием в них поверхностно активных ионов фтора и натрия. С повышением температуры поверхностное натяжение уменьшается.

Из-за различной степени смачивания включений металлом поведение их на границе раздела фаз будет различным. Схема перехода неметаллического включения в шлак показана на рисунке 10.9.

Силы всплывания включений $P_{всп}$, действуя на тонкую поверхностную пленку металла, будут вызывать возникновение усилия P_T , действующего против сил поверхностного натяжения и стремящегося разорвать эту пленку. Если P_T меньше силы поверхностного натяжения, то включение не может прорвать пленку и будет оставаться под уровнем границы раздела. В противоположном случае происходит прорыв границы раздела и создаются условия для перехода включения в шлак.

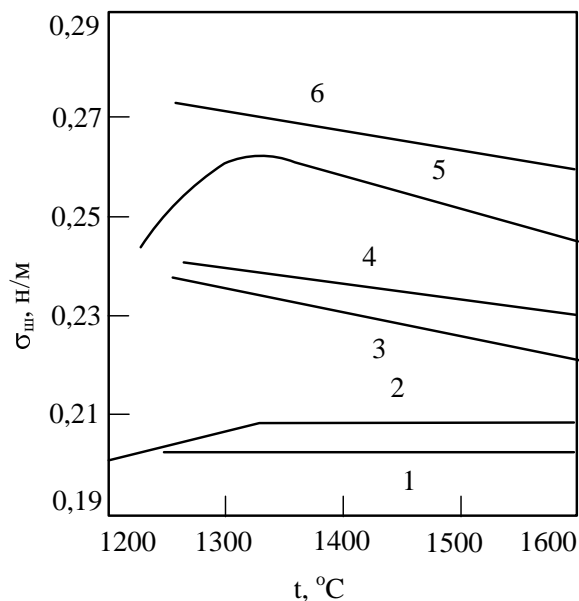


Рис. 10.8. Зависимость поверхностного натяжения синтетических шлаков $\sigma_{ш}$ от температуры. Номер у кривой соответствует условному номеру шлака (см. таблицу 10.1)

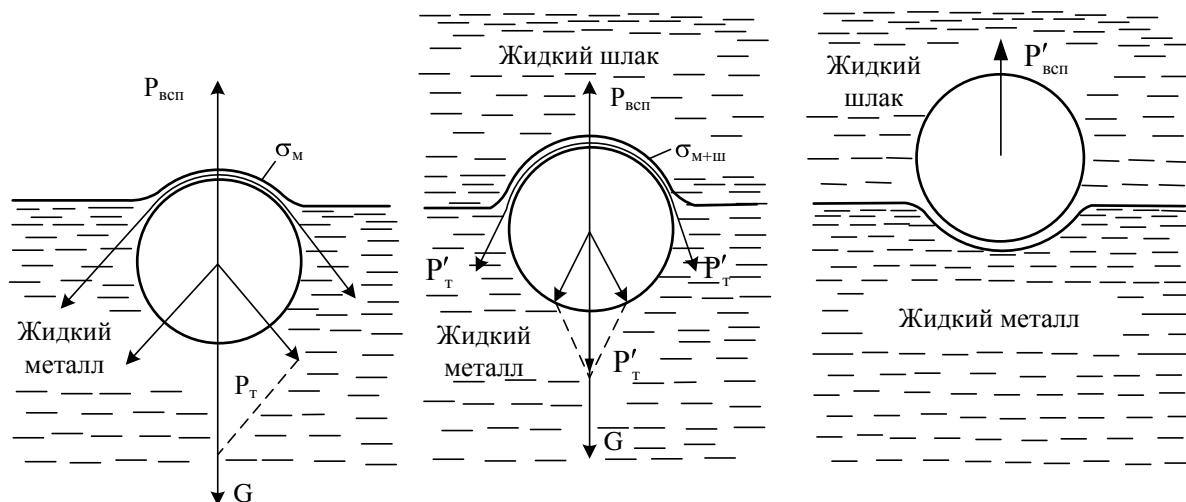


Рис. 10.9. Схема перехода неметаллических включений через границу раздела металл–шлак

Во всех случаях при применении шлаков требуется, чтобы работа когезии металла и шлака превышала работу адгезии металла и шлака, т.е. сцепление металла со шлаком должно быть меньше, чем внутреннее сцепление металла или шлака.

Наблюдаемое увеличение содержания в шлаке диоксида титана и глинозема вызывается окислением компонентов стали по реакциям: $[Al] + (SiO_2) = (Al_2O_3) + [Si]$; $[Ti] + (SiO_2) = (TiO_2) + [Si]$. Содержание крем-

незема в шлаке при этом уменьшается, а угар алюминия и титана колеблется в пределах 5 – 15 % от первоначального содержания.

Наведение жидкого шлака на поверхности металла осуществляют вводом в кристаллизатор порошкообразных экзотермических смесей или заливкой расплавленного жидкого шлака. Синтетический шлак выплавляют в специальном агрегате и сливают в футерованный ковш. Заливку в кристаллизатор производят сразу после открытия стопора промежуточного ковша. При слишком поздней заливке шлака часть заготовки, отлитая без шлака, оказывается пораженной заворотами окисленной шлаковой корочки. Толщина слоя шпика на поверхности металла должна быть в пределах $(5-15) \cdot 10^{-3}$ м. По ходу разливки состав шпика меняется. Шлак достаточно хорошо растворяет в себе оксиды хрома, марганца, алюминия и титана, что, однако, не влияет на жидкоподвижность шлака, так как они образуют легкоплавкое силикатное стекло.

Более удобным и технологичным является наведение шлака на поверхности жидкой стали в кристаллизаторе путем подачи в его рабочую полость сухой шлакообразующей экзотермической смеси в виде порошка или брикетов. Экзотермическую смесь приготавливают из следующих компонентов: силикокальция, алюминия, натриевой селитры, криолита, силикатной глыбы, борного ангидрида и др. К началу разливки приготавливают экзотермическую смесь, исходя из ее расхода $1 \cdot 10^{-3}$ кг/кг стали. По наполнении кристаллизатора металлом до уровня 0,10 – 0,20 м от затравки подается шлаковая смесь, в результате реакции между компонентами смеси на зеркале металла образуется слой расплавленного шпика. По ходу разливки экзотермическую смесь подают небольшими порциями для поддержания шлака в жидкоподвижном состоянии.

Лучшие к настоящему времени результаты получены при использовании шлаковых смесей на основе криолита, борного ангидрида, силикокальция, селитры, силикатной глыбы и окалины.

В последнее время широкое распространение получили смеси графита и шлаковых компонентов. Их успешно применяют при разливке стали с алюминием (судовой и низкоуглеродистой для автолиста), а также углеродистой инструментальной и рельсовой стали. Графит выполняет роль смазки и теплоизолятора, а шлаковая прослойка хорошо ассимилирует неметаллические включения. Расход такой смеси составляет $(0,2-0,4) \cdot 10^{-3}$ кг/кг.

Глава 11. ХАРАКТЕРНЫЕ ДЕФЕКТЫ НЕПРЕРЫВНОГО СЛИТКА И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

11.1. Горячие и холодные трещины

Из поверхностных дефектов наиболее сложными по своему происхождению и трудными по предотвращению являются горячие трещины, возникающие при температурах, близких к температурам кристаллизации. В прямоугольных слябах и заготовках такие трещины могут располагаться на их гранях и ребрах (углах). Угловые трещины в основном продольные, а трещины на гранях могут быть и продольные и поперечные. Круглые заготовки поражены, как правило, продольными трещинами.

Длина горячих трещин различна (0,1 – 1 м и более). Они имеют прерывистую и зигзагообразную (иногда с окисленными кромками) поверхность. Металл вблизи трещин обычно обезуглерожен. Эти признаки являются основными внешними отличиями горячих трещин от других видов трещин.

Механические свойства стали при высоких температурах определяют способность ее сопротивляться трещинообразованию. У большинства углеродистых марок стали хрупкое разрушение со значениями относительного удлинения, близкими к нулю, наблюдается в области температур более 1623 – 1673 К, а заметная пластичность наступает при последующем охлаждении. Низкоуглеродистые стали и стали с высоким содержанием углерода приобретают пластичность в области температур, расположенных ниже линии солидуса. Наименьшая пластичность наблюдается у сталей, содержащих 0,19 – 0,21 % С.

Напряжения от ферростатического давления в корке слитка возникают только тогда, когда она в результате усадки начнет сокращаться и отходить от стенок. Эти напряжения достигнут максимального значения при полном отходе корки от стенок. Усадочные напряжения в корке образуются с появлением сил, препятствующих сокращению ее линейных размеров.

В результате перепада температур по толщине корки и различной усадки отдельных ее слоев участки, охладившиеся до более низкой температуры, сокращаются значительно сильнее, что приводит к возникновению изгибающих моментов, стремящихся прогнуть корку. Если под действием внешних сил корка будет прижата к стенке изложницы или кристаллизатора, то в ней возникнут термические напряжения, при которых могут образовываться горячие трещины.

Холодные трещины возникают при низких температурах в металле со значительно выраженными упругими свойствами. Различают два вида холодных трещин: от температурных напряжений (наиболее распространенный вид) и от фазовых превращений (перекристаллизация). В слитках углеродистой стали фазовые превращения происходят обычно выше 973 К, когда металл обладает значительной пластичностью и ползучестью, что препятствует развитию напряжений. В таких слитках в обычных условиях холодные трещины образуются только от температурных напряжений.

Трещины от температурных напряжений являются результатом разрядки внутренних напряжений, возникающих в слитке в процессе охлаждения и нагрева. Охлаждение слитка после разливки и затвердевания вызывает изменение в нем температурного перепада по сечению (рис. 11.1), вследствие чего в слитке возникают непрерывно изменяющиеся температурные напряжения (сжимающие на поверхности и растягивающие внутри).

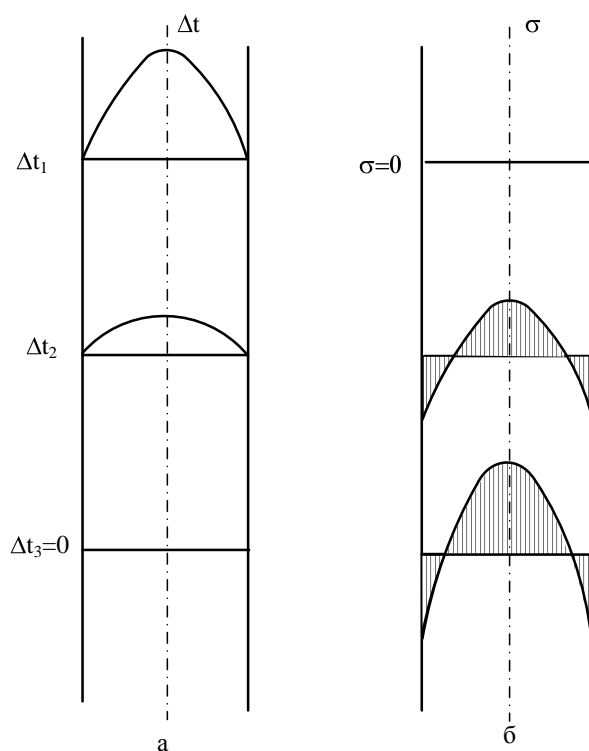


Рис. 11.1. Схема изменений градиента температур Δt (а) и напряжений σ (б) в слитке при его охлаждении

Это объясняется тем, что остывающие медленнее внешние слои слитка тормозят усадку внутренних слоев. Температурные напряжения периода охлаждения достигают максимального значения к моменту полного ос-

тывания слитка.

При повышенных температурах (более 873 К) упругие свойства стали выражены незначительно, в ней интенсивно развивается температурное разупрочнение, обуславливающее снятие напряжений, т.е. явление ползучести (пластическая деформация без роста напряжений). По мере снижения температуры металла он теряет способность к температурному разупрочнению и приобретает упругие свойства. Наиболее резкий переход из области ползучести в область упругих деформаций происходит при температуре поверхности заготовок примерно 823 – 923 К ($T_{кр}$). Образующийся к этому моменту перепад температур между поверхностью и сердцевиной заготовки определяет величину возникающих при дальнейшем ее охлаждении остаточных напряжений.

В отличие от горячих холодные трещины чаще появляются в углеродистых спокойных сталях, чем в кипящих и низкоуглеродистых. Это связано с большей пластичностью последних и округлостью усадочных дефектов в них. Повышение содержания углерода в стали приводит к росту модуля упругости, коэффициента линейного теплового расширения и увеличивает вероятность образования холодных трещин.

Ввод в металл легирующих элементов, способствующих росту температуры перехода из области ползучести в область упругих деформаций, уменьшению теплопроводности стали, увеличению коэффициента линейного расширения, модуля упругости, приводит к росту напряжений в слитке и вероятности его разрушения. Весьма склонны к образованию холодных трещин легированные, хромистые, хромоникелевые, хромоникелемолибденовые стали. Во многих легированных сталях $T_{кр}$ выше, чем в углеродистых на 100 – 150 град. В связи с ростом напряжений в малотеплопроводных сталях трещины в них могут образовываться и при охлаждении заготовок даже после длительного выдерживания на складе. С целью исключения образования трещин непрерывнолитые слябы (заготовки) подвергают отжигу в специальных печах в течение 8 – 16 ч или охлаждают в стопе под специальными теплоизолирующими колпаками. Наиболее предпочтительной является прокатка слябов (заготовок) с горячего посада. Это сокращает энергозатраты и время от конца разливки до получения готового металлопроката, а также способствует получению продукции без холодных трещин.

11.2. Шлаковые включения и газовые пузыри

При применении защитных шлаковых смесей для непрерывной разливки может повышаться загрязненность металла крупными шлаковыми включениями. Шлаковые включения, встречающиеся на поверх-

ности и проникающие внутрь металла, являются многофазными, преимущественно силикатного характера. В состав экзогенных включений, обнаруженных в непрерывных слитках коррозионно-стойкой стали X23H18, входит CaF_2 , что подтверждает шлаковое происхождение включений. В стали ОХ23Н28М3Д3Т встречаются крупные шлаковые включения глобулярной формы. В их состав входят соединения $\text{CaO}\cdot\text{TiO}_2$ и $\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$. В сортовых заготовках крупные шлаковые включения встречаются чаще в районе ребер, в слябовых – в районе узких граней. Часто шлаковые включения обнаруживают в районе складок, возникающих на поверхности в результате возвратно-поступательного движения кристаллизатора. Загрязненность непрерывных слитков крупными шлаковыми включениями зависит от состава применяемых шлаковых смесей и может быть уменьшена при соблюдении определенных условий технологии непрерывной разливки (разливке металла под уровень и правильно выбранной амплитуде качания кристаллизатора). При неудачном подборе составляющих шлаковых смесей может значительно повышаться загрязненность крупными (более 40 мкм) шлаковыми включениями. Наибольшую загрязненность имеют плавки, разлитые с применением защитных смесей открытой струей, значительно меньше загрязненность плавов, разлитых с применением шлаковых смесей с подводом металла под уровень. Практически такая же загрязненность включениями наблюдается у плавов, разлитых под жидким парафином, однако в этом случае не обеспечивается достаточно хорошее качество поверхности.

При разливке под шлаком загрязненность очень крупными шлаковыми включениями (более 200 мкм) снижается по сравнению с разливкой без защитного шлака.

При деформации стали с повышенным содержанием алюминия и титана групповые включения образуют в макроструктуре горячекатаного металла дефекты в виде полосок повышенной травимости протяженностью $(0,5-1,0)\cdot 10^{-3}$ м. При испытании цилиндрических образцов на осадку эти дефекты раскрываются в овальные трещины глубиной $(2-3)\cdot 10^{-3}$ м. На поверхности листа крупные шлаковые включения могут образовывать грубые плены и надрывы. Загрязнение непрерывных слитков крупными шлаковыми включениями происходит из-за нарушения технологии раскисления стали, прожигания стаканов промежуточных ковшей, затягивания шлака из промежуточных ковшей в кристаллизаторы, низкого уровня металла в промежуточном ковше, недостаточной глубины погружения стакана для подвода металла под уровень, некачественной шлаковой смеси, колебаний уровня металла в кристаллизаторе.

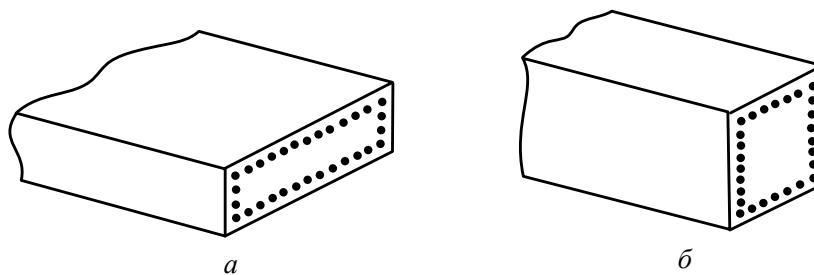
Основные меры, позволяющие уменьшить загрязненность непрерывнолитых заготовок крупными шлаковыми включениями: соблюдение порядка подачи раскислителей в ковш и температурного режима; применение более стойких огнеупорных материалов в разливочном припасе; тщательная подготовка промежуточных и сталеразливочных ковшей; обеспечение необходимого погружения стакана в металл, находящийся в кристаллизаторе; правильный подбор и применение качественной шлакообразующей смеси и равномерная подача ее в кристаллизатор, поддержание постоянного уровня металла в промежуточном ковше и кристаллизаторе.

Для уменьшения загрязненности групповыми включениями необходимо обеспечить защиту металла (при раскислении его легкоокисляющимися элементами) от вторичного окисления на пути промежуточный ковш – кристаллизатор.

Уменьшение загрязненности металла групповыми включениями так же может быть достигнуто усовершенствованием технологии выплавки и раскисления. Количество групповых включений в стали с повышенным содержанием алюминия значительно снижается при предварительном раскислении металла в сталеплавильном агрегате и в ковше жидким алюминием или алюминием в виде проволоки по сравнению с раскислением кусковым алюминием. Уменьшение загрязненности коррозионностойкой стали, содержащей титан, групповыми включениями достигается снижением содержания углерода, а, следовательно, и возможностью снижения в стали содержания титана, а также продувкой металла в ковше аргоном. Крупные шлаковые включения с поверхности заготовки устраняют зачисткой на допустимую глубину.

Газовые пузыри, иногда называемые подкорковыми – дефект макроструктуры поверхностной зоны слитка в виде единичных или групповых пор и небольших пустот округлой или вытянутой формы, заполненных газом, иногда выходящих на поверхность.

Пузыри располагаются по периметру непрерывных слитков в захоложенных участках (рис. 11.2). Наибольшее количество пузырей наблюдается в районе узких граней и углов, а также на стыке кристаллитов, растущих от узких и широких граней.



*Рис. 11.2. Схема расположения подкорковых пузырей:
а – листовая заготовка; б – сортовая заготовка*

При деформации пузыри, близко расположенные к поверхности, в результате окисления при нагреве слитков могут не свариваться и вызывать образование волосовин, плен (в случае единичных пузырей) или рванин (в случае группового расположения крупных пузырей).

Возникновение подкорковых пузырей в непрерывных слитках, как и в обычных, связано чаще всего недостаточным раскислением металла. К образованию подкорковых пузырей так же может привести повышенное содержание влаги в защитной шлакообразующей смеси, прожигание стакана промежуточного ковша, завороты окисленной корки.

Подкорковый пузырь может возникнуть практически в непрерывнолитых заготовках стали всех марок.

11.3. Паукообразные и сетчатые трещины

Наружные паукообразные или сетчатые трещины в непрерывнолитых заготовках относятся к дефектам, которые преимущественно выявляются после горячего травления или после огневой зачистки. При прокате они трансформируются в плену. Плены стали предметом пристального внимания специалистов в области непрерывной разливки лишь в последнее десятилетие. Это можно объяснить тем, что в последнее время металл непрерывной разливки широко используют для изготовления ответственных изделий, например газопроводных труб высокого давления.

Сетчатые трещины зарождаются преимущественно по впадинам рельефа поверхности, например, по складкам от возвратно-поступательного движения кристаллизатора или по ужиминам, т.е. по наиболее перегретым участкам поверхности сляба. Наибольшее количество сетчатых трещин наблюдается по вертикали, соответствующей району подвода струи. Травление поперечных темплетов с сетчатыми трещинами реактивом Стенда показало, что трещины могут распола-

гаться между столбчатыми дендритами или .пересекать их. Металл стенок трещин обезуглерожен и окислен. Глубина залегания сетчатых трещин достигает $(5-8) \cdot 10^{-3}$ м, а в отдельных случаях $(12-15) \cdot 10^{-3}$ м. Количество трещин уменьшается при снижении температуры разливаемой стали, удалении струи металла от оболочки слитка и увеличении отношения содержания марганца к содержанию серы более 50. Их количество уменьшается также при снижении интенсивности вторичного охлаждения с 1,1 – 3,2 до 0,6 – 1,0 л/кг. Отмечено влияние раздутия широких, граней сляба на образование сетчатых трещин. Так, при увеличении раздутия по широким граням с 5 до 6 – 17 мм пораженность сетчатыми трещинами возрастала примерно в два-три раза. Механизм их образования имеет промежуточный характер между механизмами образования горячих и термических трещин. Сетчатые трещины зарождаются в наиболее перегретых участках поверхности сляба, где теплоотвод по каким-либо причинам замедлен. Поверхностные слои металла из-за наличия включений, диффузии меди или других особенностей химического состава значительно ослаблены. Сильный термический удар при попадании слитка в зону вторичного водяного охлаждения способствует росту сетчатых трещин.

Образование сетчатых трещин на поверхности непрерывнолитых заготовок объясняется тем, что действующие напряжения превышают прочность границ первичных зерен, ослабленных неметаллическими включениями. Наряду с термическими и усадочными напряжениями важная роль отводится локальным напряжениям, возникающим в результате выделения водорода из твердого раствора. При выделении водорода из твердого раствора локальные напряжения могут достигать 1/4 предела прочности металла при рассматриваемых температурах. При концентрации водорода в жидком металле более $5 \cdot 10^{-4}$ % суммарное напряжение может быть разрушающим. Зависимость числа сетчатых трещин n и глубины их залегания L от содержания водорода в жидком металле характеризуется следующими данными:

$H \cdot 10^{-4}, \%$	5,0	5,0	6,2	7,0	7,8	8,1
$n, \text{шт./дм}^2$	4	нет	8	26	18	32
$L, \text{мм}$	2 – 4	–	2 – 4	2 – 6	2 – 12	3 – 13

Обращает на себя внимание значительная разница в пораженности заготовок различных плавок сетчатыми и паукообразными трещинами. Это объясняется нестабильностью физических свойств шлакового гарнисажа, образующегося в кристаллизаторе и изменяющегося под действием металлодобавок. Подобное объяснение связано с тем, что с изме-

нением физических свойств гарнисажа при замене экзотермических защитных смесей теплоизолирующими пораженность заготовок паукообразными трещинами уменьшилась примерно на порядок. Повышение чистоты границ первичных зерен, прочности и пластичности металла при высоких температурах должно менее эффективно сказываться на возникновении паукообразных трещин, связанных с появлением жидких прослоек меди по границам зерен.

Сетчатые трещины образуются ниже температур, солидуса, так как они проходят по твердым границам, ослабленным неметаллическими включениями. Образование местных участков с крупными зернами связано с местным разогревом поверхностных слоев оболочки слитка в результате нарушения ее контакта с кристаллизатором. Паукообразные трещины возникают при температурах ликвидуса и проходят по границам первичных зерен, ослабленным жидкими пленками цветных металлов или их легкоплавкими оксидами. По этому признаку трещины разделяют на сетчатые и паукообразные. Трещины обоих типов могут расти одинаково под действием термических напряжений, поэтому способы их устранения или уменьшения пораженности ими непрерывнолитых заготовок часто совпадают. Например, к таким общим способам можно отнести снижение фонда растягивающих напряжений в кристаллизаторе и уменьшение интенсивности вторичного охлаждения. Если же рассматривать только паукообразные трещины, то для предупреждения их появления необходимо устранить истирание медных стенок кристаллизатора, а также ограничить в составе шихты присутствие цветных металлов, плохо растворимых в твердой стали (медь, цинк и др.).

На практике для предупреждения паукообразных и сетчатых трещин применяют защитные смеси, образующие шлаковый гарнисаж на всей поверхности гладких рабочих стенок кристаллизатора.

Устранение сетчатых трещин неразрывно связано с мерами по ликвидации ужимин и грубой складчатости на поверхности оболочки слитка в кристаллизаторе. Практически это достигается всеми технологическими приемами, которые обеспечивают формирование равнотолщинной оболочки слитка по периметру кристаллизатора. Эффективными приемами являются также модифицирование и микролегирование поверхностных слоев заготовок в процессе разливки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Металлургический комплекс традиционно занимает стратегически важное место в экономике Российской Федерации. Однако в процессе рыночных реформ металлургические предприятия столкнулись с общими для экономики проблемами кризисного характера. Именно металлургический комплекс имеет острую необходимость в быстрейшем внедрении в производство современных технологических решений, необходимость ускоренного стратегического переоснащения большинства металлургических предприятий.

Раскрытие закономерностей в технологических процессах производства стали, в формировании структуры и свойств изделия помогает осмыслить взаимосвязь различных инженерных операций и физических процессов. Без таких знаний решить проблему комплексной системы организации технологии, производства и сбыта, ориентированной на полное удовлетворение спроса потребителей и получение прибыли, невозможно.

Как показывает мировой опыт, повышения эффективности металлургического комплекса удастся достичь при создании гибкой технологической системы, включающей металлургические мини-заводы, оснащенные высокоэффективными модулями, в которых обязательно присутствуют агрегат ковш-печь и высокопроизводительные машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). За последние годы и технология, и оборудование непрерывной разливки стали получили бурное развитие.

В сегодняшних условиях стратегия реконструкции технологического процесса, оптимизация качества стали, рабочих параметров машин непрерывной разливки для каждого конкретного металлургического предприятия является весьма актуальной. Авторы надеются, что представленный в учебном пособии материал будет полезен при подготовке специалистов металлургического профиля, а также при выполнении проектных разработок и в ходе внедрения новых технологических процессов.

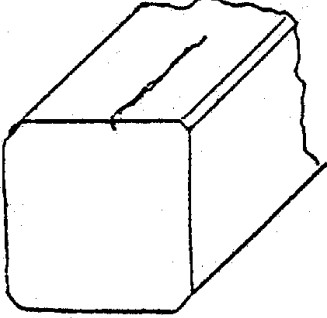
Список литературы

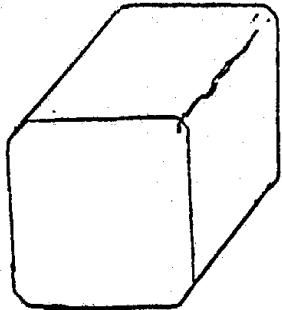
1. Гуляев А. П. *Металловедение*. – М.: Металлургия, 1977. – 648 с.
2. Бокштейн С. 3. *Строение и свойства металлических сплавов*. М.: Металлургия, 1971. – 496 с.
3. Лившиц Б. Г. *Металлография*. М.: Металлургия, 1971. – 404 с.
4. Власов Н.Н., Корроль В.В., Радя В.С. *Разливка черных металлов*. – М.: Металлургия, 1987. – 272 с.
5. Дубров Н.Ф., Власов Н.Н., Корроль В.В. *Разливка стали*. – М.: Металлургия, 1975. – 200 с.
6. Воскобойников В.Г., Кудрин В.Г., Якушев А.М. *Общая металлургия* – М.: Металлургия, 2000. – 768 с.
7. *Электрометаллургия стали и ферросплавов*. Под редакцией Д.Я. Поволоцкого. – М.: Металлургия, 1974. – 552 с.
8. Tanner A.H. *Continuous casting: A revolution in steel*. – Fort Lauderdale: Write Stuff Enterprises, 1999. – 238 p.
9. *Kontinuirano livenja celika u svetu / Privredna komora Jugoslavije*. – Beograd: 1988.–397 s.
10. Рутес В.С. *Непрерывная разливка стали / В.С. Рутес, Б.Н. Катомин*. – М.: Трудрезерв-издат, 1957. – 84 с.
11. *World Survey: Continuous Casting Machines for Steel*. – Zurich: Concast Standard, 1999.–201 p.
12. *Непрерывная разливка стали в сортовые заготовки/ В.С. Рутес, Н.Н. Гуглин [и др.]* – М.: Металлургия, 1967. – 144 с.
13. *Исследование непрерывной разливки стали*. / Под ред. Дж. Б. Лина. Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1982. – 200 с.
14. Бойченко М.С. *Непрерывная разливка стали*. – М.: ГНТИ по черной и цветной металлургии, 1957. – 238 с.
15. Германн Э. *Непрерывное литье / Э. Германн*. – М.: ГНТИ по черной и цветной металлургии, 1961. – 814 с.
16. *Основные направления развития процесса непрерывного литья/ Ф.Н. Тавадзе [и др.]*. – М.: Наука, 1982 – 165 с.
17. Wolf M. *Bloom and billet casting overview*. // 3ra European Conf. on Continuous Casting, Madrid–Spain, October 20–23, 1998. – Madrid: 1998. – P. 515 – 524.
18. *Development in mould oscillation/ T. Yamashita, J. Radot, I. McNeil, M. Wolf // Proc. 4th Int. Conf. Cont. Casting*. – Brussell: CRM/VDEh, 1988. – P. 329 – 340.
19. Horbach U., Kockentiedt J., Jung W. *High speed billet casting with parabolical mould taper // Stahl und Eisen*. 1997. No.12. – P. 95 – 101.

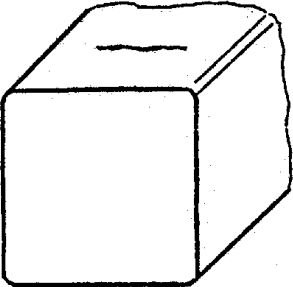
20. Stilli A. Hot processing of billets // *Concast Standard News*. 1997. No 1 (36). – P. 3 – 4.
21. Improvement of internal quality of blooms continuously cast at Sollac Florange / J. Bastian, P. Chapellier, L. Sosin ea. // *La Rev. Metalurgie*. 1997. No. 94. – P. 497 – 505.
22. Improvement of segregation of continuously cast billet by soft reduction/ K. Isobe, Y. Kusano, S. Noguchi ea.// *Proc. Near-Net-Shape Casting in the Minimills*. – Vancouver: CIM, 1995. – P. 179 – 192.
23. Sivesson P., Wass S., Rogberg B. Improvement of Center Porosity in Continuously Casting Blooms by Mechanical Soft Reduction at the End of the Solidification Process // *3rd European Conf. on Continuous Casting, Madrid-Spain, October 20-23, 1998*. – Madrid: 1998. – P. 213 – 223.
24. O'Malley R. Casting Technologies for Direct Hot Charging at Armco, Mansfield // *Steel Times Int.* – 1998, – № 1. – P. 12 – 19.
25. Resonans Mould System in Continuous Casting/ E.H.Becker, H. van Wyl, D.A. Lohse ea. // *Ironmaking & Steelmaking*. 1997. Vol. 24. – P. 174 – 179.
26. Control of early solidification in continuous casting by horizontal oscillation in synchronization with vertical oscillation of the mould/ T. Moshida, S. Itoyama, H. Tozawa ea. // *3rd European Conf. on Continuous Casting, Madrid-Spain, October 20–23, 1998*. – Madrid: 1998. – P. 515 – 524.
27. Robinson Q., Gerstl D. High performance Submerged Nozzles for Thin Slab Casting// *3rd European Conf. on Continuous Casting, Madrid–Spain, October 20-23, 1998*. – Madrid: 1998. – P. 1050 – 1052.
28. Control of Immersion Nozzle Outlet Flow Pattern Through the Use of Swirling Flow in Continuous Casting / S. Yokoya, Y. Asako, S. Hara ea. // *ISIJ International*. – 1994. – No.11 (Vol. 34). – P. 883 – 888.
29. Thomas B. Effect of argon gas on fluid in a continuous slab casting mold / B. Thomas, X. Huang // *Steelmaking Conference Proceedings*. 1993. Vol. 76. – P. 273 – 389.
30. Electromagnetic shaping for control of initial solidification in continuous casting/ M. Tani [и др.] // *Proceeding Conference on Electromagnetic Processing of Materials*. – Centre Francais de L'Electricite, 1997. – P. 527 – 532.
31. Construction of a new vertical caster at Dillinger Huttenwerke / K. Harste [и др.] // *Stahl und Eisen*. – 1997. – № 11 (Vol.117). – P. 73 – 79.
32. Letzel D. Innovations and their implementation in the field of continuous slab casting / D. Letzel, A. Weyer, A. Zajber // *3rd European Conf. on Continuous Casting, Madrid–Spain, October20-23, 1998*. – Madrid, 1998. – P. 855 – 865.
33. Линдорфер Б. Технологические модульные узлы для высокоэффек-

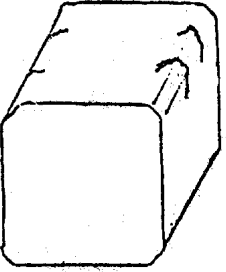
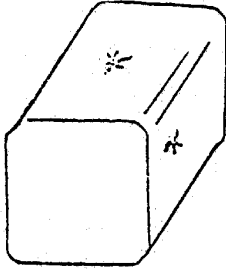
- тивного литья слябов / Б. Линдорфер, Х. Хедль, К. Мервальд // МРТ. 1999. – С. 32 – 41.
34. Нилль П. Непрерывное литье – состояние и перспективы / П. Нилль, А. Этьен // МРТ. – 1992. – С. 50 – 64.
35. Литье и обжатие с разливки тонких слябов на заводе фирмы Маннес-маннререн-Верке АГ / Х. Эренберг [и др.] // МРТ. 1990. – С. 46 – 59.
36. New technology to tackle centerline segregation / М. Hattori [и др.] // Steel technology international. 1990/91. – P. 189 – 193.
37. Нодап W. Thin slab casting-progress and potential// Steel technology international. 1990/91. – P. 195 – 197.
38. Коассин Дж. Гибкая машина для непрерывного литья тонких слябов / Дж. Коассин, У. Мерони // МРТ. 1995. – С. 40 – 53.
39. Плешиутшнигг Ф. Первый мини-завод с технологией производства полосы в линии (I.S.P.) в сопоставлениях с другими схемами производства горячекатанной полосы / Ф. Плешиутшнигг // МРТ. 1993. – С. 64 – 83.
40. Сталь на рубеже столетий / Под научн. ред. Ю.С. Карабасова. – М.: МИСИС, 2001. – 664 с.
41. Тенденции развития производства сортовых заготовок / А.А. Минаев [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2001. – № 6. – С. 25 – 28.
42. Многоручьева прокатка–разделение / В.М. Клименко [и др.]. – М.: *Металлургия*, 1987. – 168 с.
43. *Metallurgie des Stranggieliens* / Herausgeber K. Schwerdtfeger. – Dusseldorf: Stahl und Eisen. 1992. – 655 s.
44. Nove poznatky z vyzkumu plynuleho odlevani oceli / М. Pfhoda [и др.]. – Ostrava: VSB, 2001. – 177 s.
45. Минаев А.А. Тенденции развития концепции металлургических мини-заводов и комплексов / А.А. Минаев, А.Н. Смирнов // *НауКоеі праці ДонДТУ*. Вип. 31. *Металлургия*. Донецк: ДонДТУ, 2001. – С. 5 – 17.
46. Теория и практика непрерывного литья заготовок / А.Н. Смирнов [и др.]. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – 371 с.
47. Ефремов Г.В. Управление процессом рафинирования стали в промежуточном ковше // *Сталь*. – 2001. – № 4.

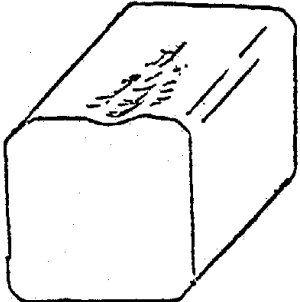
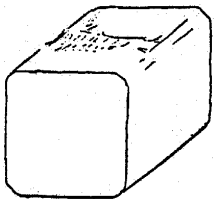
Дефекты поверхности непрерывнолитой заготовки

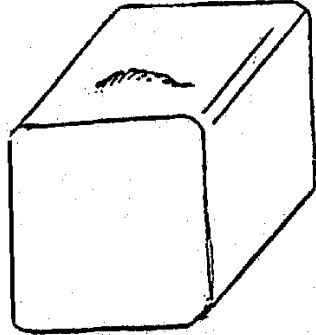
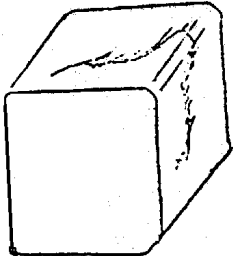
Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
<p>1. Трещины продольные наружные, по граням</p> 	<p>1.1. Подготовка металла к разливке: высокое содержание вредных примесей (сера, фосфор, медь, сурьма), низкое соотношение Mn/S (менее 20), низкое остаточное содержание алюминия, перегрев металла.</p> <p>1.2. Процесс разливки: смещение оси погружного стакана относительно оси кристаллизатора, некачественная шлакообразующая смесь (неравномерность гарнисажа), высокая скорость вытягивания (не соответствующая температуре металла), нарушение равномерности вторичного охлаждения, приводящее к одностороннему прижиму слитка в кристаллизаторе.</p>	<p>1.1. Подготовка металла к разливке в соответствии с инструкцией по выплавке и внепечной обработке со строгим соблюдением ограничений по содержанию вредных примесей, режимов раскисления и подачи металла на МНЛЗ с заданной температурой в стальковше.</p> <p>1.2. Тщательный контроль положения стакана при установке промковша в рабочем положении, корректировка, при необходимости, во время разливки. Использование ШОС заданного состава для данной группы марок стали, разливка с заданной скоростью, с учетом температуры металла, правильная установка расходов воды в ЗВО и систематический контроль за работой орошающих устройств.</p>	<p>Ограничения по вредным примесям, заданное остаточное содержание Al и температура металла оговариваются для данной марки стали в техкартах.</p> <p>Состав ШОС на данную марку стали, скорости вытягивания и режим вторичного охлаждения оговариваются в техкарте.</p>

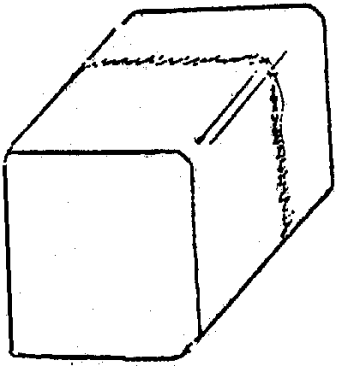
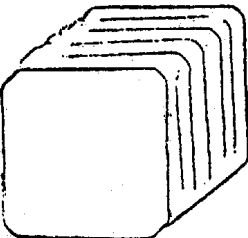
Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
	<p>1.3. Работа оборудования: засорение каналов кристаллизатора, наличие грубых продольных борозд на верхней части рабочих стенок кристаллизатора, потеря заданной конусности кристаллизатора, перекосы в качании кристаллизатора, несоосности (выше допустимых пределов между кристаллизатором и опорными устройствами ЗВО).</p>	<p>1.3. Замена кристаллизатора при возникновении прямых, ориентированных в одном положении, продольных трещин, контроль после серии плавков соосности кристаллизатора и I секции опорных устройств ЗВО, проверка и устранение перекосов в качании кристаллизаторов.</p>	<p>Допуски по соосности кристаллизатора и I секции ЗВО указаны в данной инструкции.</p>
<p>2. Трещины продольные наружные, ребровые</p> 	<p>2.1. Все факторы, оговоренные в п. 1.1.</p> <p>2.2. Все факторы, оговоренные в п. 1.2.</p> <p>2.3. Засорение канала кристаллизатора вблизи угла, потеря конусности кристаллизатора, перекося кристаллизатора при качании, несоосность кристаллизатора и опорных устройств ЗВО, нарушение геометрии поперечного сечения кристаллизатора.</p>	<p>2.1. См. мероприятия по п. 1.1.</p> <p>2.2. См. мероприятие по 1.2.</p> <p>2.3. Замена кристаллизатора, контроль и корректировка параметров качания кристаллизатора, проверка и корректировка соосности кристаллизатора.</p>	

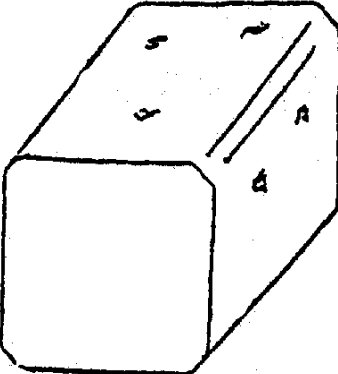
Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
<p>3. Трещины поперечные наружные</p> 	<p>3.1. Все факторы, оговоренные в п. 1.1., недораскисленный металл (повышенная адгезия).</p> <p>3.2. Смещение струи металла к одной из стенок, резкое колебание уровня металла в кристаллизаторе, неравномерность вторичного охлаждения (односторонний прижим слитка к стенке кристаллизатора), разгиб переохлажденного слитка.</p> <p>3.3. Перекос в качании кристаллизатора, коробление стенок кристаллизатора, несоосность кристаллизатора и первой опорной секции ЗВО.</p>	<p>3.1. См. мероприятия по п.1.1., строгое соблюдение положений инструкции по раскислению.</p> <p>3.2. Контроль и корректировка положения стакана по ходу разливки; тщательное соблюдение требований по поддержанию заданного уровня и пределов колебаний при ручном и автоматическом управлении расходов металла; уменьшение интенсивности охлаждения слитка в нижних секциях ЗВО; устранение перекосов в охлаждении слитка в ЗВО.</p> <p>3.3. Замена кристаллизатора; контроль и корректировка режимов качания и соосности кристаллизатора и I секции ЗВО.</p>	

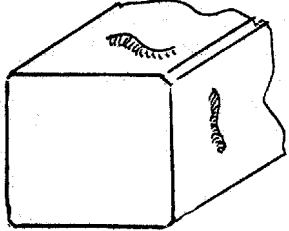
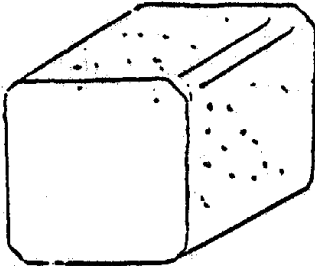
Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
<p>4. Трещины поперечные наружные, угловые</p> 	<p>4.1. Все факторы, оговоренные в п. 1.1., недораскисленный металл.</p> <p>4.2. Некачественная шлакообразующая смесь - комкование шлака в районе углов, разгиб переохлажденного слитка, перелив кристаллизатора.</p> <p>4.3. Расхождение стыков стенок кристаллизатора, несоосность кристаллизатора и опорных устройств ЗВО, перекосы в качании кристаллизатора.</p>	<p>4.1. См. мероприятия по п.1.1.</p> <p>4.2. См. мероприятия по п. 1.2. и по п.3.2.</p> <p>4.3. Замена кристаллизатора (или подчеканка стыков), контроль и регулировка механизма качания и соосности кристаллизатора и I секции ЗВО.</p>	
<p>5. Трещины наружные звездообразные</p> 	<p>5.1. Повышенное содержание меди в стали, недораскисленный металл, повышенное содержание водорода и олова в стали.</p> <p>5.2. Некачественная шлакообразующая смесь, неравномерное («пятнистое») вторичное охлаждение.</p> <p>5.3. Новый кристаллизатор (истирание стенок, диффузия меди в межкристаллитное пространство).</p>	<p>5.1. Соблюдение требований, оговоренных в инструкции по выплавке и внепечной обработке и в техкарте по содержанию меди, раскислению стали и режимам вакуумирования.</p> <p>5.2. Замена ШОС на смесь требуемого состава и свойств, режимов в ЗВО, контроль состояния орошающих устройств.</p> <p>5.3. Использование кристаллизатора с качественным покрытием.</p>	

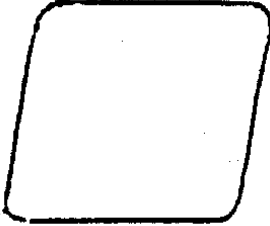
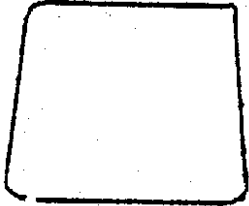
Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
<p>6. Ужимины продольные</p> 	<p>6.1. Перегретый металл.</p> <p>6.2. Смещение стакана в одну из сторон кристаллизатора, некачественная шлакообразующая смесь, односторонний интенсивный подбой воды под кристаллизатором, нарушение режима вторичного охлаждения, приводящее к одностороннему прижиму слитка в кристаллизаторе.</p> <p>6.3. Засорение канала в кристаллизаторе, несоосность кристаллизатора и опорных устройств в ЗВО.</p>	<p>6.1. Соблюдение требований инструкции и техкарты по температуре металла в стальковше на МНЛЗ.</p> <p>6.2. См. мероприятия п. 1.2.</p> <p>6.3. Замена кристаллизатора, контроль и корректировка соосности кристаллизатора и I секции ЗВО.</p>	
<p>7. Ужимины поперечные</p> 	<p>7.1. Перегретый и плохо раскисленный металл.</p> <p>7.2. Резкие колебания уровня металла в кристаллизаторе, резкое изменение скорости вытягивания.</p> <p>7.3. Несоосность кристаллизатора и опорной секции ЗВО.</p>	<p>7.1. См. мероприятия п. 6.1.</p> <p>7.2. См. мероприятия по п. 3.2. и п. 1.2.</p> <p>7.3. Контроль и корректировка соосности между кристаллизатором и опорными устройствами ЗВО.</p>	

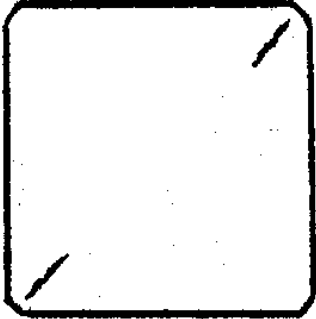
Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
<p>8. Заворот корки</p> 	<p>8.1. Низкая температура металла, недостаточная раскисленность металла.</p> <p>8.2. Низкая скорость вытягивания, резкие изменения колебания уровня металла в кристаллизаторе и резкое изменение скорости вытягивания, внезапные остановки слитка, разливка «открытой» струей, некачественная ШОС.</p> <p>8.3. Неполадки в системах управления скоростью вытягивания и расходом металла из промковша.</p>	<p>8.1. См. мероприятия по п. 7.1.</p> <p>8.2. Увеличение скорости вытягивания слитка с учетом температуры металла, стабильность скорости;</p> <p>Контроль качества погружных стаканов перед разливкой.</p> <p>8.3. Контроль и устранение неисправностей в системах управления скоростью вытягивания и регулирования расхода металла.</p>	
<p>9. Заливина</p> 	<p>9.1. Низкая температура металла, вызывающая остановки в разливке. Перегретый металл, вызывающий подплавление оболочки.</p> <p>9.2. Колебания уровня металла в кристаллизаторе, остановки вытягивания слитка длительностью более 30-40 с.</p> <p>9.3. Неполадки в работе узлов, приводящие к остановкам вытягивания слитка.</p>	<p>9.1. Подача на МНЛЗ стальнойковша с оптимальным интервалом температуры, оговоренным в техкарте.</p> <p>9.2. См. мероприятия по п. 1.2 и 3.2.</p> <p>9.3. См. мероприятия по п. 8.3.</p>	

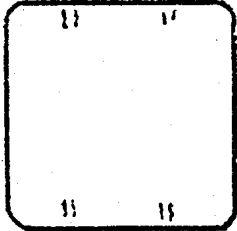
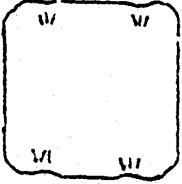
Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
<p>10. Пояс («перехват»)</p> 	<p>10.1. Нестандартные параметры металла в стальковше и в промковше, приводящие к остановке разливки (температура, раскисление).</p> <p>10.2. Затягивание стакана промковша.</p> <p>10.3. Внезапные остановки вытягивания слитка из-за неполадок в работе узлов и системе автоматического управления.</p>	<p>10.1. См. мероприятия п. 1.1.</p> <p>10.2. Соблюдение требований инструкции по выплавке (раскисление) и по разливке (защита металла от вторичного окисления). Правильный выбор диаметра стакана промковша.</p> <p>10.3. Контроль и устранение выявленных неполадок по ходу и после разливки.</p>	<p>Диаметр стакана в промковше оговаривается в техкарте.</p>
<p>11. Складчатость (глубокая, до 2-2,5 мм)</p> 	<p>11.1. Низкая температура металла, недостаточная раскисленность (факторы, влияющие на межфазное натяжение).</p> <p>11.2. Некачественная шлаковая смесь; малая скорость вытягивания; резкие колебания уровня металла в кристаллизаторе.</p> <p>11.3. Нарушения в режиме работы механизма качания кристаллизатора.</p>	<p>11.1. См. мероприятия по обеспечению заданных параметров раскисления и температуры в п. 1.1.</p> <p>11.2. Применение ШОС с большей жидкотекучестью, контроль и корректировка системы управления расходом металла.</p> <p>11.3. Контроль и устранение неисправностей в системе управления режимом качания кристаллизатора.</p>	

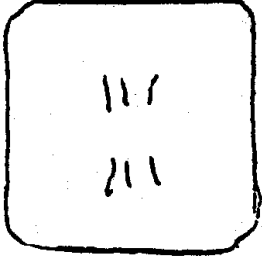
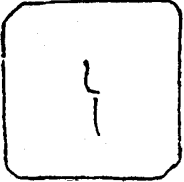
Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
<p data-bbox="302 384 510 472">12. Шлаковые включения</p> 	<p data-bbox="607 384 1171 536">12.1. «Холодный металл (увеличение вязкости ШОС или размыв огнеупоров), недостаточная раскисленность стали.</p> <p data-bbox="607 560 1171 834">12.2. Некачественная ШОС, пониженная скорость вытягивания, вторичное окисление металла, колебания уровня металла в промковше, низкий уровень металла в промковше, недостаточная глубина погружения носка погружного стакана в металл.</p> <p data-bbox="607 858 1171 1054">12.3. Некачественная футеровка, низкая стойкость погружных стаканов, нарушения в работе узлов контроля расхода металла и уровня металла в кристаллизаторе.</p>	<p data-bbox="1193 384 1758 528">12.1. Выпуск плавов с заданной инструкцией температурой и раскислением, корректировка этих параметров при внепечной обработке.</p> <p data-bbox="1193 552 1758 842">12.2. Замена ШОС (контроль ее качества, соответствия заданным характеристикам). См. мероприятия по защите от вторичного окисления (п. 14.2.), разливка с уровнем в промковше не ниже 600 мм и с глубиной погружения носка погружного стакана в металл не менее, чем на 100 мм.</p> <p data-bbox="1193 866 1758 1126">12.3. Контроль систем управления расходом металла и скоростью разливки, обеспечивающих заданные пределы колебаний уровня металла в кристаллизаторе; применение износостойких футеровок, контроль качества стаканов перед разливкой.</p>	

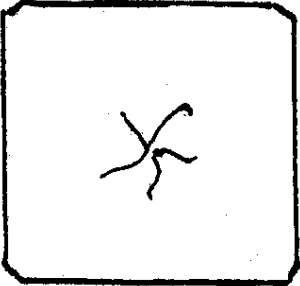
Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
<p>13. Заворот шлаковой корки</p> 	<p>13.1. Низкая температура металла, нарушения в технологии раскисления. 13.2. Причины, вызывающие появление заворотов (см. п. 8.2.) и шлаковых включений (п. 12.2.). 13.3. Причины, вызывающие колебания уровня и остановки машины (см. п. 12.3. и п. 11.3.).</p>	<p>13.1. См. мероприятия по п. 12.1. 13.2. См. мероприятия по п.п. 12.2 и 8.2. 13.3. См. мероприятия по п. 12.3., касающиеся колебаний уровня металла в кристаллизаторе.</p>	
<p>14. Газовый пузырь</p> 	<p>14.1. Недораскисленный металл, перегретый металл, неудовлетворительная выпечная обработка. 14.2. Влажная ШОС, вторичное окисление, прожигание кислородом стаканов. 14.3. Влажная футеровка стальной ковша</p>	<p>14.1. Соблюдение инструкций по выплавке и выпечной обработке. 14.2. Контроль ШОС на содержание влаги; тщательная герметизация стыков погружной трубы и погружного стакана; подача нейтрального газа в стык трубы и в стопор промковша. 14.3. Тщательная просушка по заданным режимам новой футеровки, недопущение охлаждения футеровки ковшей водой.</p>	

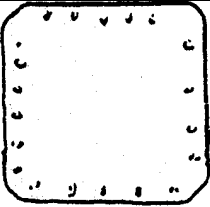
Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
<p>15. Ромбичность (квадратного слитка)</p> 	<p>15.1. Перегретый металл. 15.2. Некачественная ШОС (неравномерный гарнисаж у мениска), смещение стакана к одному из углов, неравномерное вторичное охлаждение. 15.3. Нарушения в охлаждении стенок кристаллизатора, нарушения в сборке кристаллизатора (составного), потеря конусности кристаллизатора, несоосность кристаллизатора и опорных устройств ЗВО.</p>	<p>15.1. Соблюдение положений инструкции и техкарт по температуре металла в стальковше. 15.2. Применение ШОС заданных состава и свойств, тщательная центровка стаканов при установке в промковш. 15.3. Контроль работы орошающих устройств и замена засоренных форсунок, замена кристаллизатора, тщательный контроль размеров и конусности при сборке, контроль и корректировка соосности кристаллизатора и I секции ЗВО.</p>	
<p>16. Трапецеидальность</p> 	<p>16.1. Перегретый металл. 16.2. Разливка с высокой скоростью металла с повышенной температурой; нарушения режимов вторичного охлаждения. 16.3. Отклонения в сборке и настройке кристаллизаторов. Нарушения в настройке тянуще-правильных устройств.</p>	<p>16.1. См. мероприятия по п. 15.1. 16.2. См. мероприятия по п. 1.2. 16.3. Замена кристаллизатора. См. мероприятия по п. 15.3., контроль величин обжатия в тянущих клетях.</p>	

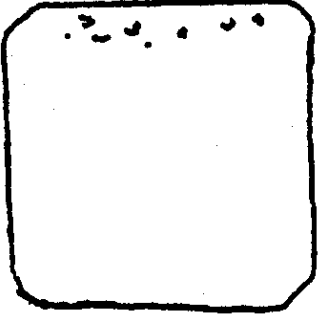
Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
<p>17. Раздутие</p>	<p>17.1. Перегретый металл. 17.2. Разливка со скоростью, превышающей нормативную с учетом температуры металла; нарушения режимов вторичного охлаждения. 17.3. Неправильная настройка поддерживающих роликов, поломка роликов.</p>	<p>17.1. См. мероприятия п. 14.1.; 15.1. 17.2. Соблюдение заданных параметров инструкций и техкарт. 17.3. Контроль и замена орошающих устройств, контроль и корректировка технологической оси, замена вышедших из строя роликов (замена секции).</p>	
<p>18. Трещины внутренние или ликвационные полоски угловые</p> 	<p>18.1. Нарушение технологии подготовки металла, приводящее к снижению технологических свойств его в температурном интервале хрупкости (см. п. 1.1.). 18.2. Нарушение теплоотвода в углах кристаллизатора; нарушение режимов вторичного охлаждения – переохлаждение углов по диагонали, смещение стакана в сторону одного из углов – факторы, приводящие к ромбичности слитка. 18.3. Неравномерный износ углов кристаллизатора, большой (более 6мм) радиус закругления стыков стенок кристаллизатора, нарушение</p>	<p>18.1. См. мероприятия по п. 1.1. 18.2. Применение ШОС оптимального состава, точная центровка погружного стакана, равномерное по периметру охлаждение поверхности слитка, особенно в зоне «подбоя» (см. также мероприятия, предотвращающие развитие ромбичности). 18.3. Контроль каналов перед установкой кристаллизатора на МНЛЗ, контроль орошающих устройств зоны «подбоя». Замена кристаллизатора с «выработанными углами или конусностью».</p>	<p>В предлагаемой инофирмой конструкции кристаллизатора большие радиусы закругления в стыках стен заменить площадками.</p>

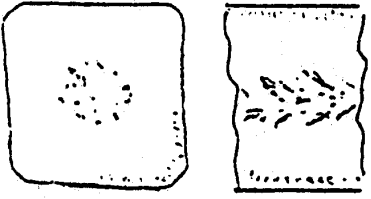
Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
	центровки кристаллизатора (перекосы при качании), потеря конусности.		
<p>19. Трещины внутренние или ликвационные полосы подповерхностные, перпендикулярные граням (в средней части граней)</p> 	<p>19.1. Факторы, снижающие свойства стали в температурном интервале хрупкости (ТИХ) – см. п. 1.1.</p> <p>19.2. Неудовлетворительное качество ШОС (неравномерный гарнисаж), неравномерный (или отсутствие) «подбой» воды под кристаллизатором</p> <p>19.3. Потеря конусности кристаллизатора, несоосность кристаллизатора и опорных устройств ЗВО (неравномерный прижим оболочки слитка к кристаллизатору).</p>	<p>19.1. См. мероприятия п. 1.1.</p> <p>19.2. Применение ШОС заданного состава, обеспечение равномерного по периметру орошения поверхности слитка под кристаллизатором.</p> <p>19.3. Замена кристаллизатора, контроль и корректировка соосности кристаллизатора и опорных устройств I секции ЗВО.</p>	
<p>20. Трещины внутренние или ликвационные полосы, перпендикулярные граням, в районе углов</p> 	<p>20.1. Факторы, снижающие свойства стали в ТИХ (см. п. 1.1.).</p> <p>20.2. Нарушения теплоотвода в районе углов кристаллизатора, переохлаждение граней в районе углов в зоне «подбоя» (появление ужимины в этих участках граней).</p> <p>20.3. Нарушения в работе орошающих устройств в «нулевой» секции ЗВО или в зоне «подбоя».</p>	<p>20.1. См. мероприятия п.1.1.</p> <p>20.2. См. мероприятия п. 20.3.</p> <p>20.3. Контроль охлаждения стенок кристаллизатора в районе углов, контроль и корректировка работы орошающих устройств в зоне «подбоя», в «нулевой» секции ЗВО.</p>	

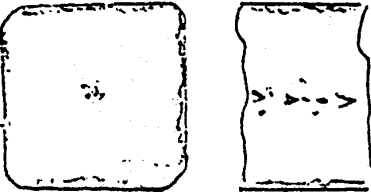
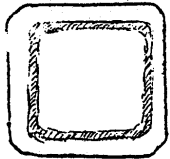
Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
<p>21. Трещины внутренние, перпендикулярные граням (в блюме) или радиальные (в круге) II ряда</p> 	<p>21.1. Факторы, снижающие свойства стали в ТИХ (см. п. 1.1.).</p> <p>21.2. Нарушения равномерности вторичного охлаждения; высокая скорость разливки (раздутие слитка).</p> <p>21.3. Неправильная выставка по размеру поперечного сечения опорных роликов ЗВО (обжим слитка); обжим слитка в двухфазном состоянии в ПТУ при высокой скорости вытягивания (превышение деформаций выше предельно допустимых).</p>	<p>21.1. См. мероприятия п. 1.1.</p> <p>21.2. Соблюдение соответствия скорости вытягивания температуре металла, обеспечение заданного режима вторичного охлаждения, особенно, равномерности по периметру.</p> <p>21.3. Контроль и корректировка просвета между роликами в поперечном сечении, контроль величин деформации в клетях ПТУ.</p>	
<p>22. Трещины внутренние осевые, перпендикулярные граням (ролика́м)</p> 	<p>22.1. Факторы, снижающие свойства стали в ТИХ (см. п. 1.1.), особенно перегрев металла, низкое содержание алюминия остаточного в стали.</p> <p>22.2. Деформация разгиба (при высокой скорости вытягивания), превышающая предельно-допустимую.</p>	<p>22.1. См. мероприятия по п. 1.1., особенно по температуре металла и содержанию остаточного Al (не менее 0,01 %).</p> <p>22.2. Снижение скорости вытягивания при повышенной температуре разливки и низком содержании алюминия в стали.</p>	

Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
<p>23. Трещины внутренние «паукообразные»</p> 	<p>23.1. Факторы, снижающие свойства стали в ТИХ, особенно, повышенная температура металла.</p> <p>23.2. Высокая скорость вытягивания, частые смены скорости без изменения расходов воды в ЗВО, переохлаждение слитка в нижних секциях с последующим отогревом поверхности (торможение усадки внутренних слоев).</p> <p>23.3. Неудовлетворительная работа системы управления расходом воды в ЗВО, нарушения в работе орошающих устройств.</p>	<p>23.1. См. мероприятия по п. 1.1.</p> <p>23.2. Соблюдение соответствия скорости и температуры разливки, а также заданного режима.</p> <p>23.3. Контроль и корректировка системы управления расходом воды в ЗВО, проверка работы орошающих устройств в верхних секциях ЗВО.</p>	
<p>24. Газовый пузырь</p>	<p>24.1. Недораскисленный или перегретый металл, неудовлетворительная внепечная обработка.</p> <p>24.2. Влажная ШОС, вторичное окисление, бурление зеркала (интенсивный расход аргона через стопор)</p> <p>24.3. Влажная футеровка различных устройств.</p>	<p>24.1. См. мероприятия п. 14.1.</p> <p>24.2. См. мероприятия п. 14.2.</p> <p>24.3. См. мероприятия п. 14.3.</p>	

			
---	--	--	--

Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
<p>25. Точечное краевое загрязнение</p> 	<p>25.1. Недораскисленный или «холодный» металл, неудовлетворительная продувка металла в ковше.</p> <p>25.2. Высокая вязкость ШОС, резкие колебания уровня металла в кристаллизаторе, бурление зеркала металла из-за интенсивности подачи аргона, низкий уровень металла в промковше (эжекция шлака), малое заглубление погружного стакана под уровень, вторичное окисление металла.</p> <p>25.3. Неудовлетворительная работа систем регулирования расхода металла (резкие колебания уровня).</p>	<p>25.1. См. мероприятия п. 1.1. (соблюдение инструкций по раскислению, температуре, выпечной обработке).</p> <p>25.2. Замена ШОС, регулирование расхода аргона через стопор, поддержание уровня металла в кристаллизаторе не ниже 500 мм, герметизация стыков погружных устройств, заглубление погружного стакана под уровень не менее, чем на 100мм.</p> <p>25.3. Контроль и корректировка работы систем управления расходом металла.</p>	

Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
<p>26. Шлаковые включения (единичные, крупные)</p>	<p>26.1. Причины, оговоренные в п. 25.2., особенно вязкость шлака и колебания уровня металла в кристаллизаторе.</p>	<p>26.1. Меры по п.п. 25.2., 25.3.</p>	
<p>27. Осевая химическая неоднородность (высокая степень развития более 2 балла)</p> 	<p>27.1. Повышенное содержание ликвирующих компонентов в стали, повышенная температура стали, недостаточная ее раскисленность.</p> <p>27.2. Повышенная скорость вытягивания слитка (особенно при повышенной температуре), нарушения во вторичном охлаждении.</p> <p>27.3. Неправильная установка или износ опорных устройств ЗВО, приводящий к раздутию слитка.</p>	<p>27.1. Снижение содержания этих компонентов до уровня, оговоренного в техкартах, соблюдение требований по температуре и раскислению стали.</p> <p>27.2. Соблюдение заданных скоростей в зависимости от температуры стали, режимов в ЗВО.</p> <p>27.3. Контроль просветов между роликами (в сечении), замена секций.</p>	

Вид дефекта	Причины возникновения	Мероприятия по их предотвращению	Примечание
<p>28. Осевая пористость (высокая степень развития более 2 балла)</p> 	<p>28.1. Высокий перегрев стали, особенно, с широким интервалом кристаллизации, слабая раскисленность, неудовлетворительная внепечная обработка (высокая газонасыщенность стали).</p> <p>28.2. Повышенная или нестабильная скорость вытягивания слитка, интенсивное вторичное охлаждение в верхних секциях ЗВО с последующим отогревом поверхности.</p> <p>28.3. Факторы, приводящие к раздутию слитка (износ или неправильная установка роликов).</p>	<p>28.1. Соблюдение требований инструкции по выплавке и внепечной обработке на данную марку стали.</p> <p>28.2. См. мероприятия по п. 27.2.</p> <p>28.3. См. мероприятия по п. 27.3.</p>	
<p>29. Светлый контур (высокая степень развития, приводящая к светлому контуру в прокате свыше 3 балла по ГОСТ 10243-75)</p> 	<p>29. Вибрация и сотрясение узлов и механизмов, неправильный режим работы ЭМП.</p>	<p>29. Контроль и настройка узлов и механизмов МНЛЗ, проверка работы устройств ЭМП, корректировка режимов электромагнитного перемешивания.</p>	

Учебное издание

Валуев Денис Викторович

НЕПРЕРЫВНАЯ РАЗЛИВКА СТАЛИ И СПЛАВОВ

Учебное пособие

Научный редактор
кандидат технических наук, *А.А. Сапрыкин*

Редактор *Л.А. Холопова*

Компьютерная верстка *А.В. Валуева*
Дизайн обложки *Д.В. Валуев*

Подписано к печати 19.01.2011. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».


Печать RISO. Усл.печ.л.14,82. Уч.-изд.л.13,42.

Заказ 1271 Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru