

Динамическая модель непрерывной разливки, версия 1.60
Руководство пользователя

1	Введение и отказ от ответственности	2
2	О данной версии	2
3	Введение в непрерывную разливку	3
4	Задачи динамической модели	4
5	Расположение оборудования цеха и описание	5
5.1	Размеры разливочных машин	5
6	Опции	6
6.1	Режим моделирования	6
6.1.1	автономный режим	6
6.1.2	интегрированный режим	6
6.2	Пользовательские уровни	7
6.2.1	Студенческий уровень	7
6.2.2	технический металлургический уровень	7
6.3	Марки стали	8
6.3.1	склонные к образованию трещин марки	8
6.3.2	склонные к прилипанию марки	9
6.4	Уровень мягкого обжата	9
6.5	Скорость разливки и вторичного охлаждения	10
6.6	Установки качания кристаллизатора	11
6.6.1	установки	11
6.6.2	метки от качания	12
6.7	Разливочный порошок (ШОС)	13
6.7.1	важные параметры	14
6.8	Заказ ковша	16
6.8.1	время	16
6.8.2	температура	17
6.8.3	расчет температуры ликвидуса	17
6.9	Обзор выбранных значений	18
7	Моделирование	18
7.1	Запуск разливки	18
7.2	Смена ковша	18
7.3	Чистота стали	19
7.4	Модель исследования деформаций для машины разливки слябов	19
7.4.1	оценка внутреннего растрескивания	20
7.4.2	оценка поверхностного растрескивания	22
7.5	Профилактика прорывов	23
8	Пользовательский интерфейс	24
8.1	Элементы управления в модели	24
8.1.1	скорость модели	24
8.1.2	поворотный стенд	24
8.1.3	ковш	24
8.1.4	промковш	24
8.1.5	Ручей	24
8.1.6	замена стакана SEN (только технический металлургический уровень)	25
8.1.7	Электромагнитное перемешивание (EMS) (только для машин разливки блюмов и заготовок)	25
8.1.8	мягкое обжатие (только для машины разливки слябов)	25
8.2	Информация о разливке	25
8.2.1	просмотреть журнал событий (клавиша E)	25
8.2.2	просмотреть струи (клавиша F)	25
8.2.3	показать/скрыть внутренние ролики (клавиша H)	25
8.2.4	просмотреть журнал уровней (клавиша L)	25
8.2.5	просмотреть качество (клавиша Q)	25
8.2.6	просмотреть температуру (клавиша T)	26
8.2.7	закрыть диалоговое окно информации по разливке (клавиша X)	26
8.3	Результаты моделирования	26
9	Библиография	27

1 Введение и отказ от ответственности

Данный документ представляет собой руководство по использованию **модели непрерывной разливки**, доступной по адресу <http://www.steeluniversity.org/>. Эта интерактивная модель – **образовательное и обучающее средство** как для студентов, изучающих черную металлургию, так и для работников отрасли.

Информация в данном документе и на соответствующем сайте подготовлена добросовестно, но мы не даем гарантий, не делаем заявлений и не принимаем на себя обязательств ни в отношении такой информации, ни в отношении информации других сайтов, связанных с данным сайтом посредством гипертекста или других ссылок (включая гарантии, заявления или обязательства в отношении того, что любая информация или использование любой такой информации с данного сайта или с других сайтов соответствует местному или национальному законодательству или требованиям каких-либо регулирующих или государственных органов), и все и любые гарантии, заявления или обязательства, которые могут подразумеваться по закону, обычаю или иначе настоящим эксплицитно исключаются. Пользователь может полагаться на любую информацию из данного документа только на свой риск. Ни при каких обстоятельствах Международный институт чугуна и стали, Ливерпульский университет или их партнеры не несут ответственности за какие-либо расходы, убытки или ущерб (прямые или косвенные, специальные, экономические или финансовые, включая упущенную выгоду), которые могут возникнуть из использования информации, содержащейся в данном документе.

Содержимое данного документа не должно рассматриваться как рекомендация технического или финансового характера предпринять или не предпринимать то или иное действие.

2 О данной версии

Это первый выпуск модели в открытом доступе, предназначенный для целей оценки. Полная версия модели непрерывной разливки будет доступна в режиме он-лайн в конце июля 2005 г.

Изменения относительно версии 1.51

- Теперь зарегистрированные пользователи могут загружать результаты из модели непрерывной разливки.
- Теперь модель учитывает уровень содержания включений из ковша. При более высоком уровне содержания включений необходимо использовать более низкие скорости разливки, чтобы предусмотреть больше времени для всплывания включений в промежуточном ковше.

Изменения относительно версии 1.41

- Основная модель усовершенствована, и соответственно изменена диаграмма качества.
- Изменены затраты на ШОС.
- Недостаточная подача ШОС теперь будет приводить к прорыву, так как из-за избыточного трения с кристаллизатором непрерывная заготовка застревает.
- Основная модель обновлена, добавлено состояние электромагнитного перемешивания.
- Теперь можно менять степень мягкого обжата в ходе разливки.

Изменения относительно версии 0.36

- Теперь замена погружного стакана занимает 15 секунд вместо 30.

- Теперь степень мягкого обжата выбирается после настройки скорости разливки, скорости охлаждения и качания кристаллизатора.
- Выбор ШОС повлияет на себестоимость производства и шансы на успех разливки.
- Теперь есть возможность переключаться между скрытыми или видимыми роликами внутри ручья.

Изменения относительно версии 0.23

- Теперь доступны все четыре марки стали.
- Доступны оба пользовательских уровня «Технический металлургический» и «Студенческий».
- Теперь может происходить застывание металла в емкости.
- Для уровня «Технический металлургический» добавлено состояние ремонта ковша, зарастание стакана и задержка поступления ковша.

Недостатки

- Поведение ручьев идентично, что в реальной жизни, конечно, невозможно.
- Температура промковша в начале выпуска основана на упрощенной модели в целях имитации предварительного нагрева промковша.
- Температура поверхности непрерывной заготовки и толщина ее стенки предварительно рассчитаны по конечноэлементной модели для разных сочетаний скоростей разливки, скоростей охлаждения и марок стали.
- Неправильно центрированные ролики можно настроить во время разливки, что совершенно исключено в реальной жизни.
- Для оптимизации работы модели в целом все лежащие в основе расчеты производятся последовательно. Однако нужно учитывать, что с увеличением скорости модели снижается уровень стали в кристаллизаторе и наоборот. Обеспечьте высокий уровень стали в кристаллизаторе перед запуском модели на высокой скорости.

3 Введение в непрерывную разливку

Непрерывная разливка стали – это процесс, в котором жидкая сталь непрерывно кристаллизуется и образует литую металлическую заготовку. В зависимости от размеров непрерывной заготовки эти полуготовые продукты называются слябами, блюмами или заготовками. Этот процесс был изобретен в 1950-х годах в попытке повышения эффективности производства стали. Ранее существовала только разливка слитков, у которой и сегодня есть свои преимущества и положительные стороны, но она не всегда отвечает требованиям по производительности. С того времени непрерывная разливка развивалась, повышался выход годного, качество продукта и экономическая эффективность.

Жидкая сталь подается на установку непрерывной разливки из цеха внепечной обработки. Обычно ковш доставляется краном и устанавливается на поворотный стенд, который разворачивает его в положение разливки. В днище ковша открывается шиберный затвор, и жидкая сталь течет через защитную трубку в промковш, емкость, выполняющую функцию буфера между стальковшом и кристаллизатором. Когда промковш заполнен, стопоры поднимаются, чтобы начать разливку стали в водоохлаждаемые медные кристаллизаторы, расположенные под промковшом. У стенок кристаллизатора начинается затвердевание, и сталь выводится из кристаллизатора при помощи затравки. По выходу из кристаллизатора у непрерывной стальной заготовки должна быть твердая корка достаточной толщины, способная выдержать вес жидкой стали, содержащейся внутри, т.е., ферростатическое давление.

В течение всего процесса разливки кристаллизатор качается в вертикальной оси для отделения затвердевшей стали от медного кристаллизатора. Для облегчения отделения вводится разливочный порошок (шлакообразующая смесь).

Непрерывную заготовку выводит из кристаллизатора комплект роликов, которые продвигают ее по дуге до горизонтальной секции. Ролики должны быть расположены близко друг к другу, чтобы предотвратить выпучивание или прорыв тонкой корки.

Когда сталь выходит из кристаллизатора, у нее есть только тонкая застывшая корочка, которой требуется дальнейшее охлаждение, чтобы завершился процесс кристаллизации. Это достигается в так называемой зоне вторичного охлаждения, где система водяных форсунок, расположенных между роликами, используется для подачи мелкодисперсного водяного тумана на поверхность стали. На этом этапе сталь, затвердевшая корочка и жидкая сердцевина называется непрерывной заготовкой.

После распрямления и полного отверждения непрерывную заготовку разрезают машиной газопламенной резки на заданные длины, которые затем отправляются на склад или на стан горячей прокатки.

Таблица 3-1. Краткое описание компонентов непрерывной разливки.

Компонент	Первичная задача	Вторичная задача
Ковш	Вмещение и транспортировка жидкой стали	Облегчение удаления включений
Поворотный стенд	Позиционирование полных стальной ковшей над промежуточным ковшем и отведение пустых стальной ковшей	Высвобождение кранов для повышения производительности
Промковш	Буфер между ковшем и кристаллизатором	Облегчение удаления включений
Кристаллизатор	Охлаждение жидкой стали до образования твердой корки	
Система непрерывной заготовки	Дальнейшее охлаждение непрерывной заготовки до полной кристаллизации и выпрямление непрерывной заготовки	

4 Задачи динамической модели

Задача динамической модели – успешно произвести последовательную разливку трех ковшей, соблюдая установленные критерии **качества поверхности, внутреннего качества и содержания включений**.

Кроме того, нужно стремиться **минимизировать** затраты на проведение этой операции.

5 Расположение оборудования цеха и описание

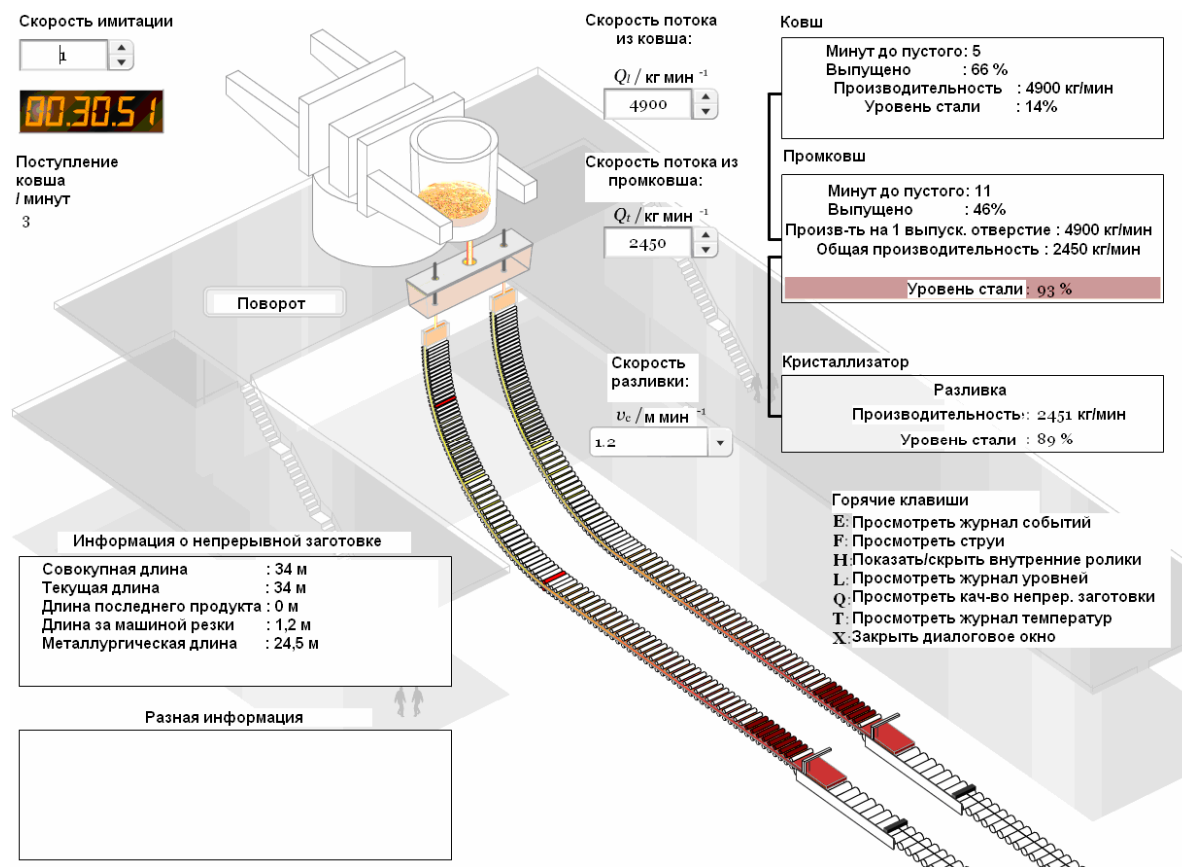


Рисунок 5-1 Экран, показывающий компоновку цеха, используемую в модели. Два ковша устанавливаются на стенд, который поворачивается и устанавливает ковш над промковшом.

Цех, имитируемый в данной модели, показан на рисунке 5-1. В начале моделирования над промковшом установлен один полный ковш.

5.1 Размеры разливочных машин

В динамической модели представлены три разных разливочных машины для разлива четырех разных марок стали. Это машины разлива слябов, блюмов и заготовок. В таблице ниже перечислены свойства разных разливочных машин.

Таблица 5-1 Таблица свойств разливочных машин

Тип	Сляб	Блюм	Заготовка
Марки стали	Сталь для трубопроводов Сверхнизкоуглеродистая сталь	Конструкционная сталь	Машиностроительная сталь
Размер ковша / метрических тонн	250	100	100
Радиус / м	9	12	8
Количество ручьев	2	5	6
Скорость разливки / м мин ⁻¹	1.0-2.0	1.2 - 1.8	3 - 5
Сечение / мм	1200 × 230 	250 × 250 	130 × 130 
Типичное использование	Плоская продукция, т.е., толстый лист, тонкий лист, рулон	Сортовая продукция, т.е., прутки, балки, сваи	Сортовая продукция, т.е., прутки, швеллер, проволока
Шаг роликов, секция I / мм	202 (35 роликов 45°)		
Шаг роликов, секция II / мм	283 (25 роликов 45°)		
Радиусы загиба/разгиба / м	R ₅₆ =9, R ₅₇ =11.3, R ₅₈ =15, R ₅₉ =22.6, R ₆₀ =45.2		

6 Опции

Перед началом моделирования важно все спланировать заранее. Первое – надо выбрать скорость разливки, которая позволит разлить сталь, соблюдая все критерии качества. Второе – для качества поверхности важно выбрать правильные настройки качания кристаллизатора. И, наконец, нужно наметить температуру жидкой стали и поступление второго и третьего ковша.

В этом разделе представлены ключевые научные теории и отношения, требующиеся для успешного моделирования. Он ни коим образом не был задуман как всестороннее рассмотрение теории непрерывной разливки или практика – за этим приглашаем пользователя обратиться к другим прекрасным публикациям.

6.1 Режим моделирования

При работе с моделью можно использовать один из режимов моделирования:

- Автономный режим
- Интегрированный режим

6.1.1 АВТОНОМНЫЙ РЕЖИМ

В этом режиме вы можете выбирать пользовательский уровень, марку стали и все параметры разливки, включая график обработки ковша и температуры. Исходные параметры модели, такие как химсостав, масса ковша, содержание включений устанавливаются по умолчанию.

6.1.2 ИНТЕГРИРОВАННЫЙ РЕЖИМ

В этом режиме такие параметры, как пользовательский уровень, марка стали, химсостав стали в ковше, температура, масса и содержание включений, загружаются из любой выполненной вами плавки в модели непрерывной разливки. Используйте раскрывающееся меню для просмотра и выбора доступных плавки (идентификационный номер плавки); информация будет отображаться ниже (см. Рис. 6-1). Имейте в виду, что содержание включений отображается в виде шкалы. Чтобы получить доступ к этому параметру, вам необходимо зарегистрироваться на сайте и войти в систему.

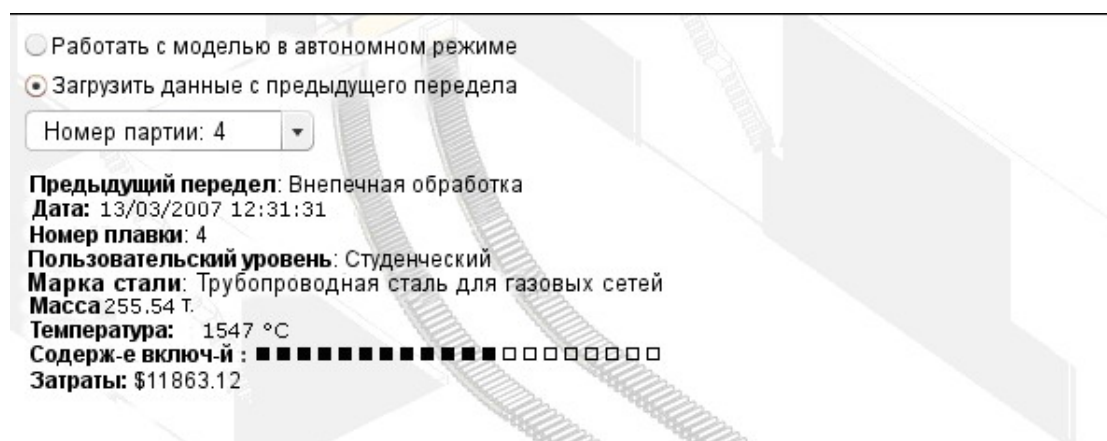


Рисунок 6-1 Экран, на котором представлены данные, загруженные с предыдущего передела

6.2 Пользовательские уровни

Интерактивная динамическая модель разработана для двух групп пользователей:

- Студентов университетов, изучающих металлургию, материаловедение и другие технические дисциплины.
- Технических работников металлургических заводов.

6.2.1 СТУДЕНЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ

Этот уровень предполагает научный подход пользователя к проблеме, использование релевантных термодинамических и кинетических теорий для принятия решений по различным вариантам обработки.

Например, пользователю нужно будет решить, какая комбинация скорости разливки и вторичного охлаждения обеспечит наилучшее качество непрерывной заготовки.

На этом уровне не потребуются преодолевать операционные проблемы, и разливка будет относительно простой.

6.2.2 ТЕХНИЧЕСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ

На этом уровне от вас ожидается научный подход к проблеме, но вы также столкнетесь с рядом рабочих проблем, требующих от вас корректировок в планировании и применения собственного опыта при принятии оперативных решений.

Типичные примеры рабочих проблем, с которыми вы можете столкнуться – задержки поступления ковша, зарастание стакана, разные состояния ремонта используемых ковшей.

Для имитации износа ковша предусмотрены три разных состояния ремонта: хорошее, приемлемое и плохое. Скорость охлаждения жидкой стали в ковше зависит от состояния ремонта, и соответствующие значения: 0,50, 0,75 и 1,00 °C мин⁻¹.

Ковши могут задерживаться на период до 10 минут. Не забывайте сравнивать заданное время доставки с расчетным временем поступления, которое показано в тексте над станцией поворотного стенда после запуска модели.

Вам также придется контролировать состояние погружных стаканов (SEN) для определения момента, когда потребуется их замена из-за зарастания. Зарастание стакана представляет собой постепенное накопление в стакане включений в процессе разливки. Оно замедляет течение струи из промковша в кристаллизатор за счет уменьшения площади сечения потока, и со временем назревает необходимость замены

погружного стакана. Для максимального замедления зарастания стакана вам нужно постоянно поддерживать высокий уровень стали в промковше (это дает включениям время подняться на поверхность). Единственный способ обнаружить зарастание стакана – контролировать скорость струи из промковша. Когда больше не удастся поддерживать требующуюся скорость струи для обеспечения заданной скорости разливки, нужно заменить стаканы. Для этого нужно:

- Снизить скорость разливки
- Остановить поток струи из промковша
- Нажать кнопку «Заменить SEN». Это потребует затрат в размере \$200 на ручей и займет 15 секунд
- Возобновить поток стали из промковша, чтобы снова заполнить кристаллизатор.
- Когда кристаллизатор заполнен, снова выйдите на заданную скорость разливки.

ПРИМЕЧАНИЕ: Важно избежать опустошения кристаллизатора во время замены стакана. Если уровень в кристаллизаторе слишком низкий, может потребоваться дальнейшее снижение скорости разливки.

6.3 Марки стали

В данной модели предусмотрено несколько разных марок стали. Это позволяет проиллюстрировать разные варианты обработки.

Конструкционная сталь общего назначения – это относительно нетребовательная, склонная к образованию трещин марка, рекомендуемая **пользователю-новичку**. Конструкционную сталь разливают на установках разливки блюмов с сечением 250 x 250 мм. Уровень содержания включений может быть умеренным, не вызывая проблем с качеством.

Сверхнизкоуглеродистая сталь, легированная TiNb – марка, склонная к прилипанию, используемая для кузовных деталей; содержание углерода менее 0,0035 %C для оптимизации штампуемости. Такую сталь разливают на слабовых разливочных машинах с сечением 1200 x 230 мм. Для удовлетворения требований к чистоте этой марки обязательно нужно следить, чтобы уровни включений были максимально низкими.

Трубная сталь для газораспределительных трубопроводов – очень требовательная марка из-за комбинации высокой прочности и высокой вязкости при разрушении с чрезвычайно низкими уровнями примесей (S, P, H, O и N) и включений. Так же, как и сверхнизкоуглеродистая марка, эта сталь требует самых низких уровней включений, и обе эти марки разливаются на слабовой разливочной машине с сечением 1200 x 230 мм. В зависимости от состава, эта марка может быть либо склонной к образованию трещин (перитектической), либо склонной к прилипанию (гипо-перитектической).

Машиностроительная сталь – низколегированная термообрабатываемая марка, разливаемая с высокой скоростью на машине литья заготовок с сечением 130 x 130 мм.

6.3.1 СКЛОННЫЕ К ОБРАЗОВАНИЮ ТРЕЩИН МАРКИ

В непрерывной разливке марки стали делятся на две подгруппы: склонные к образованию трещин и склонные к прилипанию.

Трещинообразование (продольные трещины) является серьезной проблемой среднеуглеродистых сталей (0,06 – 0,18 %C). Существует 4 % несоответствие между

коэффициентами усадки при термообработке для δ -феррита и аустенита. В результате в корочке формируются напряжения, которые выходят через продольные трещины. Обычная стратегия предполагает снятие напряжений путем поддержания минимальной толщины корочки. Это достигается сокращением теплопередачи в горизонтальной плоскости увеличением толщины твердого слоя и кристалличности твердого шлакового слоя.

6.3.2 СКЛОННЫЕ К ПРИЛИПАНИЮ МАРКИ

В противоположность описанному выше, прорывы при прилипанию происходят, когда корочка недостаточно прочна, чтобы выдержать ферростатическое давление, и жидкая сталь проливается из корочки. Здесь стратегия требует формирования более толстой корочки, и обеспечивается за счет усиления теплопередачи в горизонтальной плоскости уменьшением толщины и увеличением стекловидной фракции твердого шлакового слоя.

Таблица 6-1 Таблица химсоставов марок, представленных в модели.

	Конструкционная сталь	Сверхнизкоуглеродистая сталь, легированная TiNb, для автомобильных кузовов	Трубная сталь	Машиностроительная сталь
C	0,1450	0,0030	0,0700	0,4150
Si	0,2000	0,2100	0,1800	0,4000
Mn	1,4000	0,7500	1,0500	0,7500
P	<0,0250	0,0650	<0,0120	0,0350
S	<0,0200	<0,0120	<0,0030	0,0350
Cr	<0,1000	<0,0500	<0,0600	1,0500
Al	0,0350	0,0450	0,0300	0,0225
B	<0,0005	0,0030	<0,0050	0,0050
Ni	<0,1500	<0,0800	<0,0500	0,3000
Nb	0,0500	0,0200	0,0150	0,0000
Ti	<0,0100	0,0300	<0,0100	0,0000
V	<0,0100	-	<0,0100	0,0100
Mo	<0,0400	<0,0100	<0,0100	0,2250
As	-	<0,0010	-	0,0000
Ca	-	-	<0,0050	0,0000
N	<0,0050	<0,0040	<0,0045	0,0050
H	<0,0005	<0,0005	<0,0002	0,0002
O	<0,0010	<0,0005	<0,0007	0,0005

6.4 Уровень мягкого обжатия

Мягкое обжатие доступно только при разливке слабов и используется для уменьшения степени осевой ликвации. Чтобы получить нужный эффект от мягкого обжатия, нужно выбрать скорость разливки и вторичного охлаждения так, чтобы металлургическая длина, т.е., длина с жидкой сердцевиной, находилась в зоне мягкого обжатия.

Рисунок 6-2 показывает схему зоны мягкого обжатия. Мягкое обжатие происходит в двух сегментах, каждый длиной 2 метра. Каждый сегмент состоит из 5 роликов, расположенных с шагом около 400 мм. Зона обжатия располагается по длине непрерывной заготовки между 27 и 31 метром при разливке трубной стали и между 21 и 24 метром при разливке сверхнизкоуглеродистой стали.

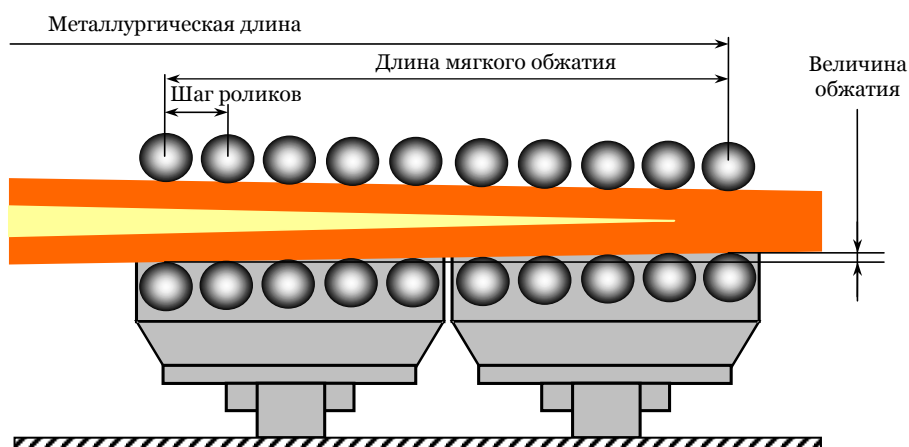


Рисунок 6-2 Графическое изображение зоны мягкого обжатия

В данной модели можно выбирать одну из 3 разных величин обжатия: мягкое, среднее и сильное обжатие с соответствующим уменьшением толщины непрерывной заготовки на 2,4 мм, 6,0 мм и 10,8 мм соответственно. Те же условия применяются к сверхнизкоуглеродистой (ULC) и трубной (LPS) стали. Поскольку положение мягкого обжатия менять нельзя, существует всего несколько комбинаций скорости разливки и вторичного охлаждения, создающих оптимальные условия для мягкого обжатия.

Эта опция доступна только при разливке стали на слябовой разливочной машине.

6.5 Скорость разливки и вторичного охлаждения

Правильный выбор сочетания скорости разливки и скорости вторичного охлаждения имеет крайнюю важность. Этот выбор будет влиять на множество параметров во время разливки и является ключевым для получения качественного продукта. Один из параметров, непосредственно зависящих от такого выбора – это **металлургическая длина** – расстояние от кристаллизатора, на котором непрерывная заготовка полностью затвердевает.

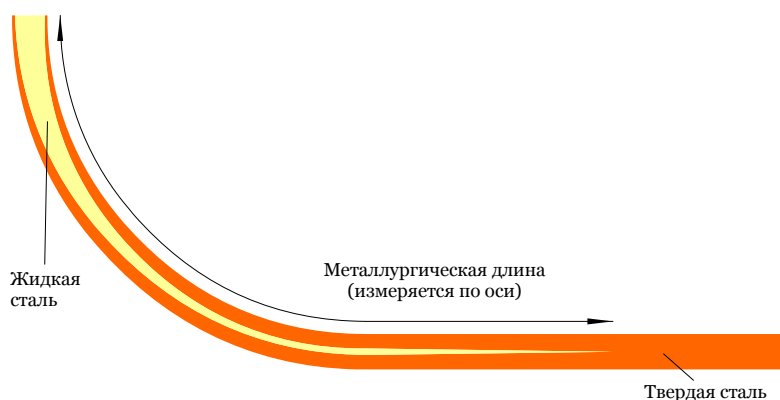


Рисунок 6-3 Иллюстрация металлургической длины

Металлургическая длина – это комплексная функция химического состава стали, скорости разливки, скорости охлаждения и размеров непрерывной заготовки, расчет которой не предусмотрен в данной модели. Для принятия разумных решений в отношении выбираемых параметров разливки пользуйтесь таблицами ниже.

У разных типов разливочных машин разные скорости разливки и охлаждения. Таблицы ниже иллюстрируют зависимость металлургической длины от этих параметров.

Таблица 6-2 Металлургическая длина для конструкционной стали на машине разлики блюмов сечением 250 × 250 мм.

Скорость охлаждения / кг воды на кг стали	Скорость разлики / м мин ⁻¹			
	1,2	1,4	1,6	1,8
0,3	22,48	26,55	30,43	34,65
0,4	21,78	25,57	29,10	33,12
0,5	20,96	24,43	27,55	31,26
0,6	20,04	23,17	25,57	29,22

Таблица 6-3 Металлургическая длина для сверхнизкоуглеродистой стали на машине разлики слэбов сечением 1200 × 230 мм.

Скорость охлаждения / кг воды на кг стали	Скорость разлики / м мин ⁻¹					
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
0,4	19,03	23,06	27,23	31,55	36,06	40,73
0,5	18,30	22,16	26,16	30,30	34,62	39,10
0,6	17,67	21,38	25,23	29,22	33,36	37,70
0,7	17,11	20,70	24,43	28,30	32,28	36,47
0,8	16,63	20,10	23,70	27,46	31,35	35,40

Таблица 6-4 Металлургическая длина для трубной стали на машине разлики слэбов сечением 1200 × 230 мм.

Скорость охлаждения / кг воды на кг стали	Скорость разлики / м мин ⁻¹					
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
0,4	20,17	24,50	28,98	33,65	38,55	43,56
0,5	19,40	23,56	27,86	32,35	37,02	41,87
0,6	18,75	22,74	26,88	31,20	35,70	40,37
0,7	18,17	22,02	26,04	30,21	34,56	39,10
0,8	17,65	21,40	25,30	29,33	33,57	37,97

Таблица 6-5 Металлургическая длина для машиностроительной стали на машине разлики заготовок сечением 130 × 130 мм.

Скорость охлаждения / кг воды на кг стали	Скорость разлики / м мин ⁻¹		
	3,0	4,0	5,0
0,8	17,20	22,40	28,00
0,9	16,70	21,53	26,83
1,0	16,20	20,73	25,66
1,1	15,70	19,86	24,42
1,2	15,20	19,06	23,33

6.6 Установки качания кристаллизатора

Качание кристаллизатора в первую очередь применяется для уменьшения трения между плитами кристаллизатора и корочкой непрерывной заготовки. Этому способствует индуцированный поток разливочного порошка (ШОС) от мениска по зазору между корочкой непрерывной заготовки и плитами кристаллизатора.

6.6.1 УСТАНОВКИ

Шаг, S [мм]: Обычно шаг варьируется от 3 до 10 мм. С увеличением шага пропорционально увеличивается время отставания непрерывной заготовки (см. ниже). Следовательно, увеличивается глубина меток от качания и расход ШОС.

Частота, f [мин⁻¹]: Традиционные гидравлические механизмы качания кристаллизатора работают с частотой от 100 до 250 циклов в минуту. С увеличением частоты возрастает время отставания заготовки, следовательно, уменьшается глубина меток от качания и расход ШОС.

Время отставания заготовки, t_N [с]: время отставания непрерывной заготовки – это период, в который скорость опускания кристаллизатора выше скорости разливки:

$$t_N = \frac{60}{\pi f} \arccos \frac{1000 v_{\text{cast}}}{\pi f S} \text{ [с]} \quad 6-1$$

где:

f = частота, мин⁻¹
 S = ход, мм
 v_{cast} = скорость разливки, м мин⁻¹

Глубина метки от качания, d [мм]: Притом, что качание кристаллизатора необходимо при непрерывной разливке, оно вызывает ухудшение качества поверхности из-за так называемых меток от качания. Для поверхности непрерывно литой заготовки характерно присутствие меток, которые периодически образуются на мениске из-за возвратно-поступательного движения кристаллизатора. Они играют важную роль для качества поверхности, так как часто становятся причиной поперечных трещин.

Глубина меток от качания зависит от выбора ШОС, величины хода кристаллизатора, частоты качания и скорости разливки. Выборка значений из литературы [1] дает следующее:

$$d = 0.065 \cdot 1.145^S \cdot (200 \cdot 0.9^S)^{t_N} \text{ [мм]} \quad 6-2$$

где:

t_N = время отставания заготовки, с

6.6.2 МЕТКИ ОТ КАЧАНИЯ

Рисунок 6-4 показывает механизм образования меток от качания. В верхней части рисунка – положение кристаллизатора, меняющееся с течением времени. Механизм образования меток от качания очерчен в нижней части рисунка. Время отставания заготовки (заштрихованные участки) – основной фактор, влияющий на образование меток от качания. Увеличение времени отставания сопровождается увеличением глубины метки от качания.

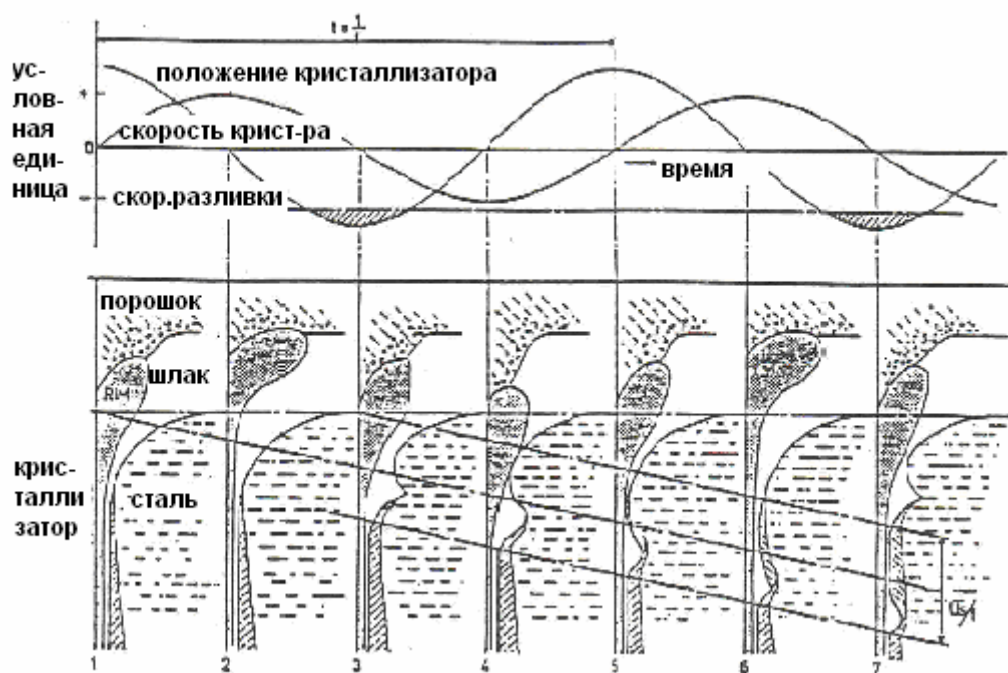


Рисунок 6-4 Образование меток от качания [2]

Чтобы минимизировать глубину меток от качания важно правильно оптимизировать настройки качания. Время отставания заготовки должно быть как можно ближе к величине 0,11 секунд в комбинации с таким ходом, который обеспечит самую маленькую возможную глубину метки.

Отметьте, что максимальная допустимая глубина метки от качания для сверхнизкоуглеродистых сталей – 0,25 мм, а для всех других марок – 0,60 мм.

6.7 Разливочный порошок (ШОС)

Разливочный порошок – это синтетический шлак, который непрерывно подается на поверхность жидкой стали во время разливки. Порошок расплавляется и стекает между стенками кристаллизатора и корочкой непрерывной заготовки. Правильный выбор разливочного порошка имеет критическую важность для хорошего качества литого материала. В первую очередь выбор порошка влияет на глубину метки от качания и расход порошка.

Разливочный порошок предназначен, чтобы:

- Выступать в роли лубриканта между непрерывной заготовкой и кристаллизатором
- Повышать теплопередачу от непрерывной заготовки к кристаллизатору
- Обеспечивать теплоизоляцию верхней поверхности ванны жидкого металла
- Защищать жидкую сталь от переокисления
- Поглощать включения, поднимающиеся к поверхности металла

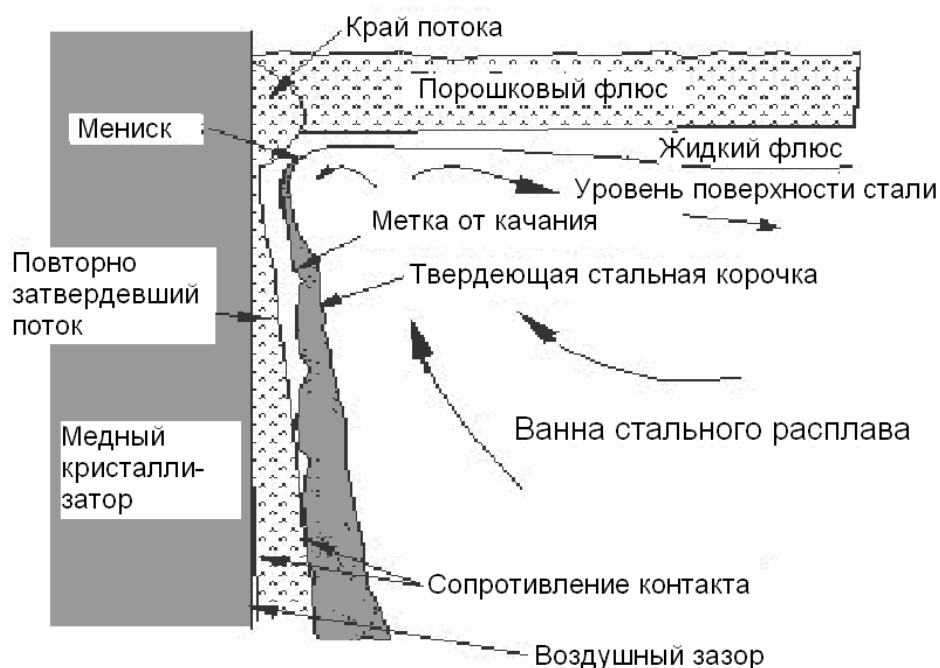


Рисунок 6-5 показывает общее распределение порошка в кристаллизаторе при непрерывной разливке. Порошок подается на верхнюю поверхность жидкой стали, находящейся в кристаллизаторе. Он плавится и заполняет зазор между кристаллизатором и непрерывной заготовкой в мениске. Это заполнение – основной процесс в непрерывной разливке, так как оно необходимо для обеспечения хорошей смазки и равномерного теплообмена между заготовкой и кристаллизатором

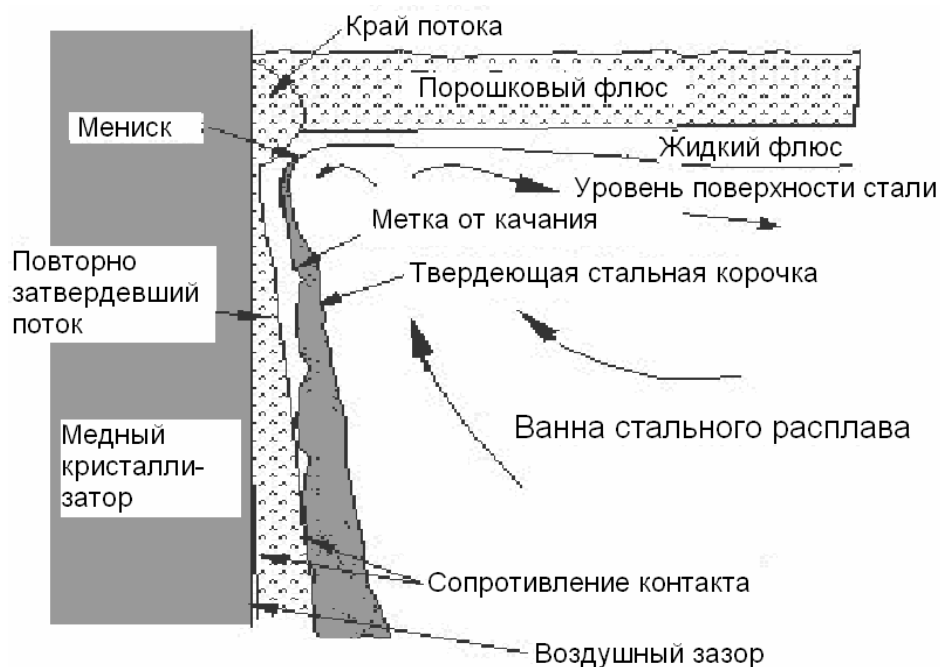


Рисунок 6-5 Функция разливочного порошка [3]

6.7.1 ВАЖНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Расход разливочного порошка (ШОС) зависит не только от выбранного типа порошка, но и от настроек качания и скорости разливки. Расход измеряется как масса на единицу площади поверхности заготовки, напр., кг м⁻². Поскольку расплавленный

порошок закачивается в зазор между кристаллизатором и непрерывной заготовкой под воздействием качающихся движений кристаллизатора, настройки качания играют важную роль для расхода порошка.

В литературных источниках встречаются разные отношения для определения расхода ШОС. В данной модели для его расчета применяется следующее выражение:

$$Q = \frac{1.7 \times t_N}{\sqrt{\eta} \times v_{\text{cast}}} \quad [\text{кг/м}^2] \quad 6-3$$

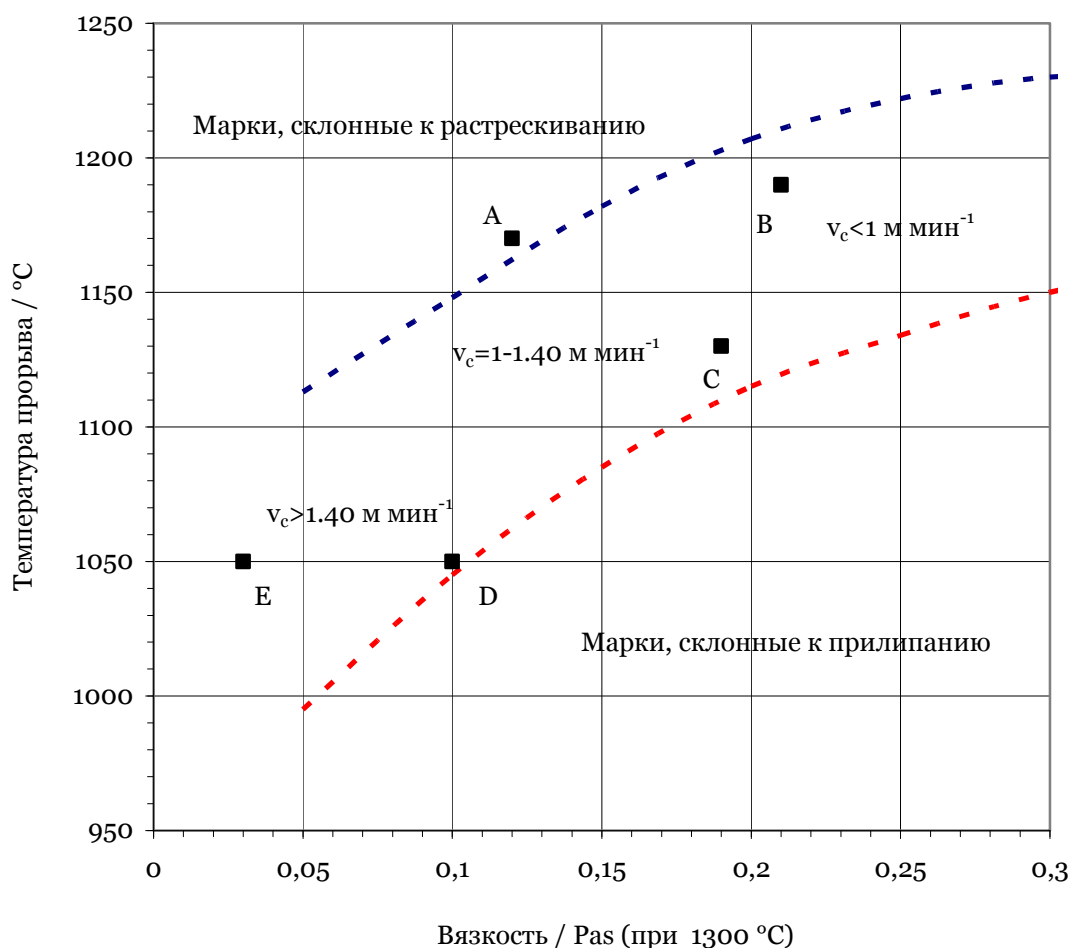
где

- Q = расход ШОС на единицу площади, кг м^{-2}
 t_N = время отставания заготовки, s
 η = вязкость разливочного порошка, Па с
 v_{cast} = скорость разливки, м мин⁻¹

Слишком низкий расход ШОС вызовет прилипание заготовки к кристаллизатору, в итоге приводя к прорыву. Чтобы этого избежать, расход порошка должен быть больше 0,30 кг м^{-2} за исключением машиностроительных сталей, для которых приемлемое значение 0,15 кг м^{-2} .

Одно из самых важных свойств ШОС – **температура прорыва**. Она определяется как пороговая температура, при которой резко повышается вязкость порошка, т.е., точка, в которой жидкая смазка начинает прорываться.

Error! Reference source not found. показывает зависимость температуры прорыва



от скорости разливки. Марку, склонную к образованию трещин, нужно разливать с порошком А или В, чтобы обеспечить наилучшие условия, а марки, склонные к прилипанию, нужно разливать с порошком типа С или D.

Таблица 6-6 содержит данные о свойствах материала и затратах на пять разных применимых видов порошка.

Таблица 6-6 Свойства доступных разливочных порошков.

Порошок	Вязкость / Pa s	Температура прорыва / °C	Затраты / \$ на кг	Цель
A	0,12	1170	0,40	Для склонных к
B	0,21	1190	0,35	растрескиванию марок
C	0,19	1130	0,45	Для склонных к
D	0,10	1050	0,50	прилипанию марок
E	0,03	1050	0,55	Для разливки на высокой скорости

6.8 Заказ ковша

Цель модели – выполнить последовательную разливку трех ковшей. В начале моделирования первый ковш установлен над промковшом, а два других должны поступить позже. Вы можете выбрать температуру, при которой будут поступать все три ковша и расчетное время прибытия последних двух ковшей. Учтите, что в интегрированном режиме моделирования (см. Раздел **Error! Reference source not found.**) фактическое время поступления ковшей будет зависеть от ваших результатов работы с моделью внепечной обработки. Чем ближе вы будете к заданному времени поступления ковшей в модели внепечной обработки, тем точнее будут сроки поступления второго и третьего ковша в модели непрерывной разливки. Это дает широкие возможности оптимизации контроля времени-температуры, чтобы достичь требуемых условий в кристаллизаторе.

Расчетное время прибытия вводится как количество минут, истекших с начала моделирования, а **расчетная температура прибытия** вводится как °C.

Помните, что с течением времени температура стали снижается из-за тепловых потерь. Предполагается, что величина тепловых потерь для ковша составляет 0,5 °C мин⁻¹.

6.8.1 ВРЕМЯ

Время, за которое опорожняется ковш, определяет требуемый интервал между ковшами, напр., настройте время прибытия ковша 2 так, чтобы опорожнение ковша 1 завершилось непосредственно перед или непосредственно после поступления ковша 2. Время опорожнения зависит от площади поперечного сечения кристаллизатора / непрерывной заготовки, количества ручьев на 1 промковш и скорости разливки.

Объем материала, разлитого на ручей в минуту, дается как:

$$\dot{V} = w \cdot t \cdot v_c \text{ [м}^3 \text{ мин}^{-1}\text{]} \quad 6-4$$

где:

- w = ширина заготовки, м
- t = толщина заготовки, м
- v_c = скорость разливки, м мин⁻¹

Таким образом, **масса** материала в минуту для промковша выражается как:

$$\dot{M}_T = n \cdot \rho_{\text{liq}} \cdot w \cdot t \cdot v_c \text{ [кг мин}^{-1}\text{]} \quad 6-5$$

где:

n = количество ручьев

ρ_{liq} = плотность жидкой стали, 7400 кг м⁻³

В установившемся режиме разливки (т.е. при постоянной v_c) время выпуска из ковша до заданного уровня стали выражается как:

$$\tau = \frac{m_{\text{ladle}}}{\dot{M}_T} = \frac{m_{\text{ladle}}}{n \cdot \rho_{\text{liq}} \cdot w \cdot t \cdot v_c} \text{ [мин]} \quad 6-6$$

где:

m_{ladle} = масса жидкой стали для выпуска из ковша в кг. Заметьте, что выпуск автоматически останавливается, когда на шибберном затворе обнаруживается шлак, обычно, когда уровень стали достигает 5 %.

Пример

Вы разливаете трубную сталь на машине разливки слябов с двумя ручьями с сечением 1,5 на 2,0 м. Скорость разливки 1,8 м мин⁻¹, и сталь доставляется на разливку 200-тонными ковшами. Рассчитайте время, требующееся для разливки ковша в установившемся режиме, учитывая, что разливка останавливается на уровне 5 %.

$$\tau = \frac{200\,000 \times 0.95}{2 \times 7400 \times 1.5 \times 0.2 \times 1.8} = 23.8 \text{ [мин]}$$

6.8.2 ТЕМПЕРАТУРА

Чтобы у стали в кристаллизаторе была оптимальная температура, важно заказывать ковши с правильной температурой. На студенческом уровне жидкая сталь в ковше остывает на 0,5 °С мин⁻¹, но на техническом металлургическом уровне скорость охлаждения зависит от состояния ковша и может варьироваться от 0,5 до 1,0 °С мин⁻¹.

Путем внимательного подсчета суммарного времени от начала моделирования до момента опорожнения ковша можно вывести величину падения температуры. Далее можно рассчитать необходимую температуру стали в момент поступления ковша.

6.8.3 РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛИКВИДУСА

Крайне важно не допустить, чтобы температура жидкой стали понижалась ниже температуры ликвидуса (т.е., температуры начала отвердевания стали). Температура ликвидуса, T_{liq} , зависит от состава и может рассчитываться по следующему уравнению [5]:

$$T_{\text{liq}} = 1537 - 78\%C - 7.6\%Si - 4.9\%Mn - 34.4\%P - 38\%S$$

На практике нужно поддерживать температуру стали слегка выше температуры ликвидуса из-за разницы температур в стали (на краях и в углах отмечается тенденция к понижению температуры). Разница между температурой ликвидуса и фактической температурой называется **перегрев**. Проверяйте, чтобы величина перегрева всегда была больше 10 °С, чтобы избежать застывания.

Большой перегрев уменьшает толщину корочки непрерывной заготовки в силу дополнительной тепловой энергии, которую должен поглотить кристаллизатор. Если в каком-то месте толщины корочки не достаточно, чтобы выдержать вес непрерывной заготовки, произойдет прорыв. Максимальный перегрев составляет 50 °C для машин разливки слябов и 60 °C для машин разливки блюмов и заготовок.

6.9 Обзор выбранных значений

Последний экран перед началом модели позволяет вам просмотреть все выбранные вами опции. После нажатия кнопки «Продолжить» запустится модель, и вы не сможете вернуться и изменить свой выбор без перезапуска модели.

7 Моделирование

После того, как выбраны все настройки для вашей непрерывной разливки, можно начинать разливку. Задача – контролировать струю стали из ковша в промковш и в кристаллизатор так, чтобы поддерживать выбранную скорость разливки и получать хорошее качество отливки. Вам также потребуется менять ковши, проверять разрегулировку роликов и резать непрерывную заготовку на полуготовые продукты.

7.1 Запуск разливки

Первый шаг – начать разливку ковша. Откройте шиберный затвор, чтобы увеличить скорость потока стали из ковша в промковш. Для этого можно нажать на стрелку «вверх» или «вниз», либо непосредственно ввести число на автоматическом регуляторе с пометкой "Скорость потока из ковша".

По достижению достаточного буферного уровня стали в промковше поднимите стопоры, чтобы ускорить поток из промковша в кристаллизатор. Это можно сделать щелчком или вводом числа в автоматическом регуляторе с пометкой "Скорость потока из промковша".

Подождите, пока уровень в кристаллизаторе поднимется до достаточного уровня (предпочтительно более 70%), затем начните разливку, выбрав соответствующую скорость разливки.

Вам нужно будет сбалансировать поток между стальковшом, промковшом и кристаллизатором так, чтобы уровни всегда были достаточно высокими. Обычно нужно нацеливаться на уровень 80-90% и в промковше (см. Раздел **Error! Reference source not found.**) и в кристаллизаторе (во избежание прорыва, см. Раздел **Error! Reference source not found.**). Однако понятно, что нельзя допускать переполнения этих емкостей.

7.2 Смена ковша

Последующие ковши автоматически опускаются на поворотный стенд. На техническом металлургическом уровне возможны задержки подачи длительностью до 10 минут, так что будьте готовы адекватно реагировать на это.

Обязательно остановите поток из ковша, прежде чем поворачивать его и устанавливать новый ковш над промковшом.

Во время замены стальковшей уровень в промковше неизбежно снизится, поэтому заранее предусмотрите достаточно высокий уровень стали в промковше. Начало разливки ковша должно проходить с повышенной скоростью, чтобы восполнить уровень в кристаллизаторе до заданного уровня после замены ковша.

7.3 Чистота стали

Некоторые применения, такие как трубопроводы для нефти и газа, требуют очень чистой стали, т.е., стали с очень низкими уровнями включений оксидов и сульфидов, которые могут становиться точками зарождения трещин. Химические процессы образования оксидов и сульфидов и их последующего удаления при внепечной обработке чрезвычайно сложны и являются предметом продолжающегося исследования. За более подробной информацией обращайтесь к статьям и книгам на эту тему.

В данной модели перед вами будет стоять задача достижения «умеренного», «низкого» или «очень низкого» уровня включений в зависимости от выбранной марки стали. На конечный уровень включений влияют разные факторы. Предполагается, что уровень включений в стали, поступающей на разливочную станцию, соответствует уровню, необходимому, чтобы в результате получить достаточно чистую сталь. Например, если вы разливаете машиностроительную сталь, уровень включений не должен обязательно быть очень низким; для этих целей достаточно обеспечить низкий уровень включений, поэтому чистота стали в поступившем ковше будет низкой с самого начала. Однако это не означает, что разливка автоматически будет успешной.

Уровень включений в стали можно поддерживать на существующем уровне или даже слегка понизить, используя промковш как буфер. Это позволяет отводить включения к стенкам промковша и в шлаковый слой на верху жидкой стали. Таким образом, длительное пребывание в промковше очень важно для разливки максимально чистой стали. При более высоком уровне содержания включений необходимо использовать более низкие скорости разливки, чтобы предусмотреть больше времени для всплывания включений в промежуточном ковше. Учтите, что в интегрированном режиме моделирования (см. Раздел **Error! Reference source not found.**) уровень содержания включений загружается из результатов моделирования внепечной обработки.

7.4 Модель исследования деформаций для машины разливки слабов

Для сверхнизкоуглеродистой и трубной стали предполагается использовать разливочную машину с равномерным изгибом. Рисунок 7-1 представляет схематическое изображение машины разливки слабов. Направляющее устройство проводит непрерывную заготовку по кривой до самого конца разгибающей секции. Криволинейная часть делится на две зоны, в одной 35 роликов, в другой 25 роликов.

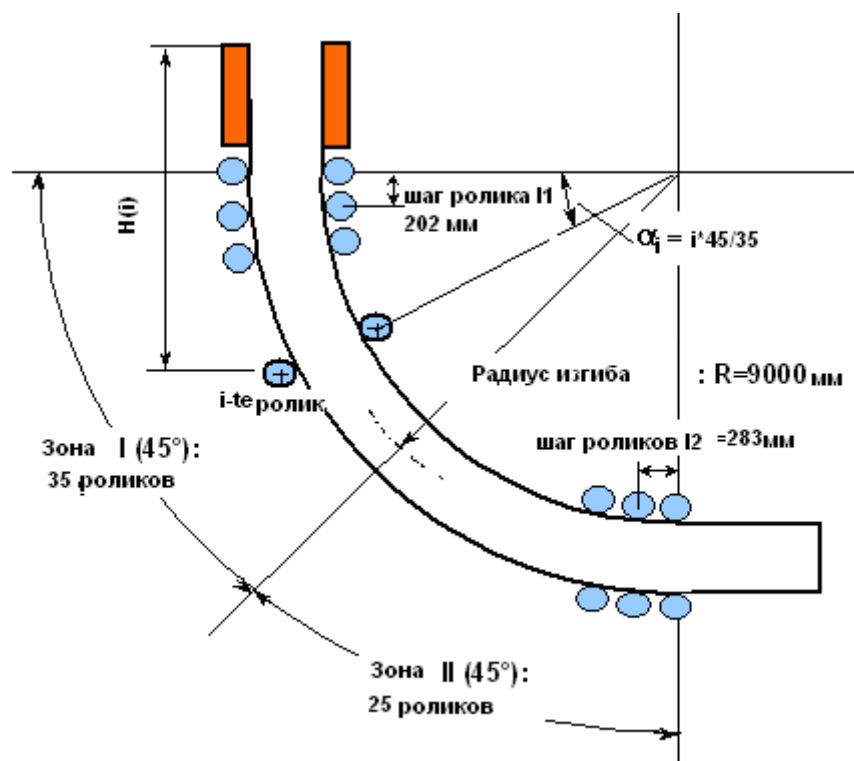


Рисунок 7-1 Схематическое изображение разливочной машины

В следующем разделе будет приведена теоретическая основа образования внутренних и поверхностных трещин вместе с рабочими уравнениями, по которым модель рассчитывает эти явления.

7.4.1 ОЦЕНКА ВНУТРЕННЕГО РАСТРЕСКИВАНИЯ

Чтобы оценить возможность внутреннего растрескивания, деформация по фронту кристаллизации сравнивается с критической деформацией. Таким образом, деформация по фронту кристаллизации, вызванная процессом на каждом ролике, может рассчитываться следующим образом [6-8].

Деформация растяжения на фронте кристаллизации, вызываемая выпучиванием, загибом, разгибом и неправильной центровкой опорных роликов, рассчитывается по следующим эмпирически уравнениям. Деформация, вызываемая загибом и разгибом, определяется как:

$$\varepsilon_{BS} = 100 \cdot \left(\frac{d}{2} - S \right) \cdot \left| \frac{1}{R_{n-1}} - \frac{1}{R_n} \right| \quad 7-1$$

где:

- d = толщина сляба, мм
- S = толщина корочки, мм
- R_{n-1} и R_n = радиусы роликов № $n-1$ и n , мм

И загиб, и разгиб происходят по многоточечному (пятиточечному) методу. Рисунок 7-2 показывает метод пятиточечного разгиба с расчетным радиусом. Метод загиба такой же, что и метод разгиба с идентичными радиусами.

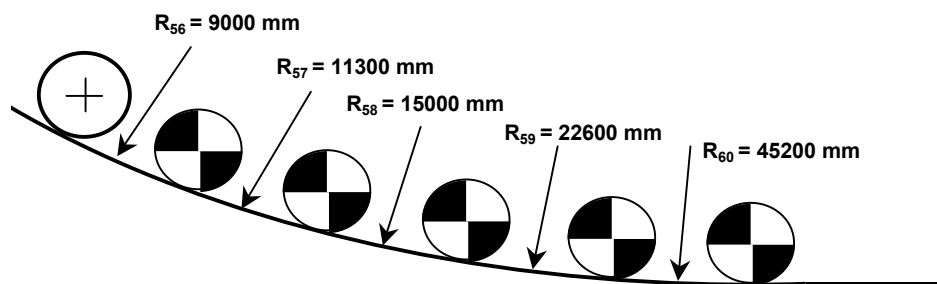


Рисунок 7-2 Метод пятиточечного разгиба

Чтобы рассчитать деформацию выпучивания ε_B (%), может применяться типичная эмпирическая формула:

$$\varepsilon_B = \frac{0.101972 \cdot P \cdot l^3}{3800 \cdot S^3} \cdot 100 \quad 7-2$$

где:

- S = толщина кристаллизовавшейся корочки, мм
 P = статическое давление жидкой стали, Н мм⁻²
 l = шаг роликов, мм

Деформацию по причине неправильной центровки роликов ε_M (%) можно оценивать, пользуясь следующим уравнением:

$$\varepsilon_M = 1.15 \cdot \frac{3 \cdot S \cdot \delta_M}{l^2} \cdot 100 \quad 7-3$$

где:

- δ_M = величина расцентровки роликов, мм

И, наконец, полная деформация по фронту кристаллизации $\varepsilon_{\text{intern}}$ во время непрерывной разливки сляба рассматривается как сумма деформаций, вызываемых загибом/разгибом, выпучивания и неправильной центровки роликов следующим образом:

$$\varepsilon_{\text{intern}} = \varepsilon_{BS} + \varepsilon_B + \varepsilon_M \quad 7-4$$

Когда полная деформация превышает критическую деформацию, образуются внутренние трещины. Критическая деформация зависит от состава стали и скорости деформации [8]. Конструкционные и машиностроительные марки стали могут выдерживать критическую деформацию около 1%, а трубные и сверхнизкоуглеродистые стали имеют деформацию прилб. 2%.

Формирование внутренних трещин будет ограничивающим фактором для повышения скорости разливки. Требования к трубной и сверхнизкоуглеродистой сталям таковы, что недостатки внутреннего качества приводят к отсортровке слябов.

7.4.2 ОЦЕНКА ПОВЕРХНОСТНОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ

Для оценки качества поверхности сляба сверхнизкоуглеродистой или трубной стали предполагается, что может происходить только поперечное растрескивание [9]. Поверхностная деформация $\varepsilon_{\text{surf}}$, возникающая во время непрерывной разливки, рассматривается как сумма деформаций, вызываемых загибом/разгибом ε_{BS} , неправильной центровкой роликов ε_{M} , выпучиванием кристаллизующейся корочки ε_{B} и термической усадкой ε_{th} :

$$\varepsilon_{\text{surf}} = \varepsilon_{\text{BS}} + \varepsilon_{\text{M}} + \varepsilon_{\text{B}} + \varepsilon_{\text{th}} \quad 7-5$$

Деформацию на поверхности, вызываемую загибом/разгибом, можно приблизительно выразить как:

$$\varepsilon_{\text{BS}} = 100 \cdot \frac{d}{2} \cdot \left| \frac{1}{R_{n-1}} - \frac{1}{R_n} \right| \quad 7-6$$

где:

- d = толщина сляба, м
- R = радиус ручья, м
- N = номер ролика

Как уже описывалось (Рисунок 7-2), загиб и разгиб происходит по пятиточечному методу. Деформация от неправильной центровки роликов может определяться по изменению радиуса, вызываемого отклонением от первоначального положения любого ролика как:

$$\varepsilon_{\text{M}} = 100 \cdot \frac{d}{2} \cdot \left| \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_d} \right| \quad 7-7$$

где:

- R_0 = радиус первоначального положения, мм
- R_d = отклонившееся положение ролика, мм

По предположению поверхностная деформация в силу выпучивания кристаллизующейся корочки равна деформации по фронту кристаллизации в силу выпучивания, и, следовательно, может рассчитываться по уравнениям (7-2) и (7-3). Температурная деформация рассчитывается как продукт коэффициента теплового расширения α и разницы температур ΔT :

$$\varepsilon_{\text{th}} = \alpha \cdot \Delta T \cdot 100 \quad 7-8$$

Предполагается, что для расчета поверхностной деформации из-за выпучивания можно использовать то же уравнение (Уравнение 7-2), что и для расчета деформации по фронту кристаллизации.

Элемент объема на поверхности непрерывной заготовки проходит через весь процесс непрерывной разливки, поэтому нужно рассчитать полную сумму поверхностной деформации $\varepsilon_{\text{surf}}^{\text{tot}}$, где n – количество роликов.

$$\varepsilon_{\text{surf}}^{\text{tot}} = \sum_i^n \varepsilon_{\text{surf}}(i) \quad 7-9$$

Если полная деформация поверхности превышает критическую деформацию, образуются поверхностные трещины. Критическая деформация зависит от химсостава стали, глубины меток от качания и температуры поверхности в зоне разгиба [9]. Легированные Nb стали (трубные и конструкционные) сильно подвержены образованию поверхностных трещин. Температура поверхности не должна опускаться ниже 1050 °C для трубной стали и ниже 1100 °C для конструкционной стали. Кроме того, метки от качания должны быть максимально мелкими. Глубина более 0,2 мм приведет к более высокой критической деформации. Слябы и блюмы с поверхностными трещинами должны подвергаться огневой зачистке. Затраты на зачистку составляют 3% от себестоимости. Сверхнизкоуглеродистые слябы с поверхностными трещинами будут подвергаться огневой зачистке и отсортировываться из-за высоких требований к отделке поверхности.

7.5 Профилактика прорывов

Прорыв происходит, если ферростатическое давление превышает прочность корочки непрерывной заготовки. Его избегают, следя за тем, чтобы толщина корочки в любой отдельной точке заготовки была достаточной, чтобы выдержать вес жидкой стали над этой точкой.

Поскольку вероятность прорыва возрастает с уменьшением толщины корочки, очень важно поддерживать высокий уровень стали в кристаллизаторе и минимальный возможный перегрев. Это позволяет корочке затвердеть до достаточной толщины, прежде чем сталь выйдет из кристаллизатора. Учитывая, что тонкая корочка может прорваться под давлением жидкой стали, метки от качания должны быть как можно мельче в глубину.

В зависимости от точного состава, марка трубной стали может быть либо перитектической, либо гипоперитектической. Перитектические составы очень склонны к растрескиванию, и потому требуют большой аккуратности при разливке, чтобы избежать формирования трещин и распространения их по корочке с последующим прорывом.

Следующее уравнение углеродного эквивалента может использоваться, чтобы определить, является ли сталь перитектической или нет. У перитектической стали углеродный эквивалент будет больше 0,1 массовой доли C [10].

$C_{\text{eq}} = \%C - 0.1\%Si + 0.04\%Mn - 0.04\%Cr + 0.1\%Ni - 0.1\%Mo$	7-10
---	------

Также очень важно правильно подобрать ШОС для конкретной марки. Если использовать порошок, подходящий для другого типа стали, повышается вероятность прорыва. Кроме того, уровень разливочного порошка всегда должен быть достаточно высоким, чтобы обеспечивать полную смазку между кристаллизатором и непрерывной заготовкой.

Подводя итог, чтобы избежать прорыва, поддерживайте:

- Уровень в кристаллизаторе между 80 и 90 %
- Низкий перегрев
- Неглубокие метки от качания
- Правильно подобранную ШОС

8 Пользовательский интерфейс

В данном разделе описывается основная «механика» моделирования, напр., как перемещать ковш, как добавлять легирующие, как управлять разным оборудованием и др.

8.1 Элементы управления в модели

8.1.1 СКОРОСТЬ МОДЕЛИ

Модель может работать с разными скоростями от $\times 1$ до $\times 32$. Скорость можно менять в любой момент во время работы с моделью. Самая высокая рекомендуемая скорость – $\times 16$. Щелкните на стрелочки так называемого числового пошагового регулятора, чтобы увеличить или уменьшить скорость модели с шагом 1. Другой вариант – щелкнуть двойным щелчком внутри поля, показывающего текущую скорость модели, чтобы выделить текущую величину, стереть ее, ввести новую скорость модели и нажать "Enter".

8.1.2 ПОВОРОТНЫЙ СТЕНД

Стенд с ковшом может поворачиваться от нажатия кнопки «Поворот». Стенд нельзя повернуть, пока на нем нет ковша или во время уже выполняемого поворота. Его также нельзя повернуть, если открыт шиберный затвор. Если у вас возникают трудности с поворотом поворотного стенда, убедитесь, что эти три критерия соблюдены.

8.1.3 КОВШ

Поток из стальной ковша в промковш регулируется числовым пошаговым регулятором, обозначенным «Поток из ковша». Пошаговый регулятор действует как контроллер скорости модели. Скорость потока из ковша регулируется с точностью до 100 кг мин^{-1} .

8.1.4 ПРОМКОВШ

Поток жидкой стали из промковша регулируется числовым пошаговым регулятором «Поток из промковша». Пошаговый регулятор действует как контроллер скорости модели. Скорость потока из промковша в кристаллизатор регулируется с точностью до 25 кг мин^{-1} .

8.1.5 РУЧЕЙ

Скорость разливки регулируется выбором одного из вариантов, перечисленных в ниспадающем окне «Скорость разливки». Варианты с префиксом '*' используются для начала разливки. Обратите внимание, что разлитая непрерывная заготовка может отвечать требованиям по какому-либо из критериев качества только после выбора допустимой скорости разливки, т.е., скорости разливки, не помеченной '*'.

Неправильно центрированные ролики меняют цвет, чтобы показать, какая пара роликов расцентрирована. Чтобы просмотреть, насколько сильно расцентрирование и сколько будет стоить ремонт, наведите мышь на цветные ролики. Чтобы отцентрировать ролики, т.е., откорректировать пару роликов, просто щелкните по цветному ролику. Стоимость этой операции автоматически добавится к вашим общим эксплуатационным затратам.

ПРИМЕЧАНИЕ: В реальности расцентрированные ролики исправляются между разливками, а не во время разливки.

8.1.6 ЗАМЕНА СТАКАНА SEN (только технический металлургический уровень)

Погружные стаканы SEN можно менять нажатием кнопки "Заменить SEN". Стаканы SEN можно менять, только когда поток из промковша остановлен. Требуется 15 секунд, чтобы заменить SEN, и это стоит \$200 на ручей дополнительно к общим затратам.

8.1.7 ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ (EMS) (ТОЛЬКО ДЛЯ МАШИН РАЗЛИВКИ БЛЮМОВ И ЗАГОТОВОК)

Электромагнитное перемешивание (EMS) может использоваться на машинах разливки блюмов или заготовок. Применение EMS способствует уменьшению сегрегации в непрерывной заготовке, улучшая внутреннее качество. Если у вас вызывает трудности достижение требуемого качества по сегрегации, попробуйте разливать с электромагнитным перемешиванием. Электромагнитное перемешивание включается или отключается щелчком на кнопку "EMS", в зависимости от текущего состояния. Когда ESM включено, контур кнопки подсвечивается.

8.1.8 МЯГКОЕ ОБЖАТИЕ (ТОЛЬКО ДЛЯ МАШИНЫ РАЗЛИВКИ СЛЯБОВ)

Степень мягкого обжатия во время разливки можно менять из ниспадающего окна «Мягкое обжатие», расположенного рядом с зоной мягкого обжатия, отмеченной темно-красным цветом. На выбор предложены варианты «отключено», «слабое», «среднее» и «сильное».

8.2 Информация о разливке

Имеется возможность просматривать детальную информацию о разливке во время и после работы с моделью. Нажатием на соответствующую клавишу предлагаются следующие виды.

8.2.1 ПРОСМОТРЕТЬ ЖУРНАЛ СОБЫТИЙ (КЛАВИША E)

Журнал событий фиксирует в хронологической последовательности все основные события, включая некоторые уставки модели. Это полезно для прослеживания всех ваших действий и всего, что произошло до настоящего момента моделирования. Кроме того, это также поможет вам проанализировать ваши результаты в конце моделирования, так как в журнале часто даются пояснения причин, по которым вам что-то удалось или не удалось.

8.2.2 ПРОСМОТРЕТЬ СТРУИ (КЛАВИША F)

При нажатии 'F' открывается диаграмма струй жидкой стали, текущих из стальной ванны в промковш и из промковша в кристаллизатор.

8.2.3 ПОКАЗАТЬ/СКРЫТЬ ВНУТРЕННИЕ РОЛИКИ (КЛАВИША H)

Нажатием 'H' происходит переключение отображаемыми и скрываемыми внутренними роликами ручья. Это дает вам очень полезную возможность просматривать весь ручей при разливке сверхнизкоуглеродистой или трубной стали на слябовой разливочной машине.

8.2.4 ПРОСМОТРЕТЬ ЖУРНАЛ УРОВНЕЙ (КЛАВИША L)

Если нажать 'L', то можно посмотреть, как изменился уровень жидкой стали в стальной ванне и в промковше.

8.2.5 ПРОСМОТРЕТЬ КАЧЕСТВО (КЛАВИША Q)

При нажатии 'Q' открывается графическая презентация непрерывной заготовки в состоянии после. Будут отмечены хорошие и плохие участки, а также будут показаны

основные параметры непрерывной заготовки. Эта опция доступна только после завершения моделирования.

8.2.6 ПРОСМОТРЕТЬ ТЕМПЕРАТУРУ (КЛАВИША T)

Нажатием 'T' можно вызвать показ изменения температуры в динамике по времени в стальковше и в промковше. Эта опция доступна только после завершения моделирования.

8.2.7 ЗАКРЫТЬ ДИАЛоговое ОКНО ИНФОРМАЦИИ ПО РАЗЛИВКЕ (КЛАВИША X)

При нажатии 'X' закрывается диалоговое окно с информацией о разливке.

8.3 Результаты моделирования

После окончания разливки всей стали и получения непрерывной заготовки работа с моделью будет завершена, и на экран будут выведены результаты операции разливки. Сразу будут показаны четыре ключевых параметра, а затем вы сможете детально рассмотреть успехи и недостатки выполненной разливки, подробно рассмотрев один из пяти видов. Ключевые параметры включают:

Общую длину отлитого металла, выраженную в метрах.

Длину, отвечающую требованиям по качеству, выраженную в метрах и в %.

Общие эксплуатационные затраты, выраженные в \$, которые включают почасовые эксплуатационные затраты и дополнительные затраты на ремонт расцентрованных роликов, проведение измерения температуры и т.д.

Затраты на метрическую тонну, что представляет суммарные эксплуатационные затраты, деленные на массу разлитой стали, отвечающей требованиям по качеству.

Подробные экраны включают информацию о температуре, уровне и колебаниях потоков в ковше и промковше, а также журнал событий и журнал качества. Эти экраны призваны помочь в анализе процедуры разливки и выявить, откуда может возникнуть проблема, а также дают подсказки, где нужно доработать условия разливки.

Журнал качества показывает колебания качества в разлитой непрерывной заготовке. Таким образом, первый разлитый материал по $x = 0$ на графике, а последний разлитый материал – в правом углу. Существует пять категорий недостатков непрерывной заготовки:

- Внутренние трещины
- Поверхностные трещины
- Осевая ликвация
- Содержание включений
- Метки от качания

График показывает качество непрерывной заготовки по этим пяти критериям. Заштрихованные участки показывают, где критерии качества не выполнены. Такие дефекты имеют разную значимость для разных сталей. Некоторые поверхностные дефекты можно удалить огневой зачисткой, другие требуют понижения сортности стали, а в самом худшем случае – отбраковывается вся длина. Отрезки без дефектов всегда подходят для запланированного применения. Смотрите в Таблица 8-1, какие встречные меры должны быть приняты, в зависимости от дефектов, присутствующих в разлитой стали.

Таблица 8-1 Дефекты качества и соответствующие меры.

Сталь	Огневая зачистка	Понижение сортности	Отбраковка
Конструкционная	Поверхностные трещины	Любые два дефекта	Больше двух дефектов
Сверхнизкоуглеродистая	Поверхностные трещины или метки от качания	Любой дефект	Больше двух дефектов
Трубная	Поверхностные трещины или метки от качания	Внутренние трещины или осевая ликвация или содержание включений	Больше двух дефектов
Машиностроительная	-	Любые два дефекта	Больше двух дефектов

Понижение сортности отрезанного куска снизит прибыль на 20%, а отбраковка в скрап – на 80%. Затраты на огневую зачистку отрезка составляют около 2,5 % себестоимости марки стали. Чтобы повысить экономическую эффективность, очень важно постараться разлить непрерывную заготовку без дефектов.

Внутренние трещины и поверхностные трещины определяются по деформации и напряжениям во время разливки непрерывной заготовки. Возможные меры по профилактике трещинообразования – это правильный подбор шлакообразующей смеси и качания кристаллизатора, чтобы глубина метки от качания была < 0,2 мм, и хорошее обслуживание машины в отношении центровки роликов.

Осевую ликвацию можно уменьшить, если правильно выбрать комбинацию скорости разливки и скорости вторичного охлаждения, чтобы точка окончательной кристаллизации была в зоне мягкого обжата. После того, как это требование выполнено, следующим шагом по оптимизации будет дальнейшее увеличение уровня мягкого обжата для достижения более сильного уменьшения толщины.

Содержание включений можно уменьшить, если максимально увеличить время пребывания жидкой стали в проковше. Это достигается за счет поддержания высокого уровня стали в проковше и/или разливки на более низких скоростях.

Метки от качания зависят от настроек качания, выбранных до начала моделирования. Неудача здесь означает, что настройки нужно оптимизировать, чтобы метки от качания были меньше.

9 Библиография

- 1) E Schürmann *et al.*: *Einfluss der Kokillenoszillation auf die Oberflächenqualität von Stranggussbrammen*, Stahl und Eisen, 1986, vol. 106, pp. 1196-1201
- 2) H Tomono: *Elements of oscillation mark formation and their effect on transverse fine cracks in continuous casting of steel*, Doctor Thesis, EPF Lausanne, 1979
- 3) AISE, *The Making, Shaping and Treating of Steel*, Casting Volume CD, AISE, 2003
- 4) Normanton *et al.*: VAI's 8th Continuous Casting Conference, 2000, Linz, Austria
- 5) T Kawawa: Report of 6th Meeting on Solidification of Steel, No. 6-III-9, Japan 1973
- 6) Y Morita *et al.*: *Strain analysis on internal cracks in continuously cast steel slab*, The Sumitomo Search, 1985, vol. 30, pp. 19-30
- 7) Z K Han and B Liu: *Prediction and Analysis of Internal Cracks in Continuous Cast Slabs by Mathematical Models*, ISIJ International, 2001, vol. 41, pp. 1473-1480
- 8) Y M Won *et al.*: *A New Criterion for Internal Crack Formation in Continuously Cast Steels*, Met. Mat. Trans B, 31B (2000), 779-794
- 9) M Suzuki *et al.*: *Simulation of transverse crack formation on continuously cast peritectic medium carbon steels slabs*, Steel Research, 1999, no. 70, pp. 412-419

- 10) M Wolf: *Initial Solidification and Strand Surface Quality of Peritectic Steels* in Continuous Casting vol. 9, Iron- and Steel Society, Warrendale, USA, 1997
- 11) G Arth *et al.*: *Mould powder consumption in continuous casting of steel*, Bachelor Thesis, Department of Metallurgy, University of Leoben, 2004
- 12) H Steinrück *et al* : *Modeling for fluid flow in continuous casting*, Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Austria, Leoben, 1996, vol. 141, no. 9, pp. 399-403, ISSN: 0005-8912