

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

№ 4(18)

Декабрь 2009



Проектирование. Исследование. Производство

**Манипулятор, обеспечивающий ввод в конвертер
элементов поплавоквого типа
для отсечки конечного шлака
при выпуске стали в разливочный ковш**

**Донецкий национальный технический университет
Кафедра "Механическое оборудование заводов черной металлургии"
Телефон: + 38 (062) 301-08-39. Эл. почта: ersp@meta.ua, bedas@ukr.net**

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

№ 4(18)
ДЕКАБРЬ 2009

международный научно-технический и производственный журнал

Главный редактор
В.Я. Седуш, д.т.н.

Редакционный совет:

С.И. Авакумов, к.т.н.
В.Г. Артюх, к.т.н.
Е.А. Башков, д.т.н.
Ю.Н. Белобров, к.т.н.
В.И. Большаков, д.т.н.
В.С. Волошин, д.т.н.
В.И. Дворников, д.т.н.
С.П. Еронько, д.т.н.
А.А. Ищенко, д.т.н.
И.А. Ленцов, к.т.н.
А.А. Минаев, д.т.н.
С.С. Самотугин, д.т.н.
В.А. Сидоров, к.т.н.
А.Н. Смирнов, д.т.н.
В.В. Суглобов, д.т.н.
А.А. Троянский, д.т.н.
В.И. Фарберов, к.э.н.
Ф.Л. Шевченко, д.т.н.
С.Л. Ярошевский, д.т.н.

Редакторы:

А.Л. Сотников, А.В. Рябухин (рубрика
"Технологические предложения")

Учредитель и издатель:

ООО "Технопарк ДонГТУ "УНИТЕХ"
83001, Украина, Донецк,
ул. Артема, 58
Телефоны: +38 (062) 348-50-56,
+38 (066) 029-44-30
Эл. почта: m-lab@ukr.net
Интернет: assom.donntu.edu.ua

Представительство в России:

ООО "ТОИР Консалт"
121108, Россия, Москва
ул. Кастанаевская д. 27, корп. 2
Телефон/факс: +7 (495) 775-85-02
Эл. почта: info@toir-consult.ru
Интернет: www.toir-consult.ru

"Металлургические процессы
и оборудование"
2009, №4(18)

ISSN 1816-1200

Издается с мая 2005 г.

Периодичность издания: 4 раза в год

Журнал реферировается
Всероссийским институтом
научной и технической информации
Российской академии наук (ВИНИТИ РАН)

Подписной индекс в каталогах:

"Пресса Украины" – 98832
"Газеты, журналы" (Агентство
ОАО "Роспечать") – 21897

Свидетельство

о государственной регистрации
КВ 11997-868Р от 21.11.2006

Свидетельство

о внесении издателя в
Государственный реестр
субъектов издательской деятельности
ДК 1017 от 21.08.2002

За содержание статей и их
оригинальность несут ответственность
авторы. Мнение редакции может
не совпадать с мнением авторов.
За содержание рекламных материалов
ответственность несет рекламодатель.

Подписано к печати 30.12.2009.

Формат 60×84 1/8. Заказ 1212.

Тираж 1000 экз. Печать

ООО "Цифровая типография", 2009.

© А.Л. Сотников, 2005-2009

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВО

Якобше Р.Я., Нагорная Е.Н., Кучаев А.А., Касьян Г.И.
Влияние электромагнитного перемешивания жидкой стали
в кристаллизаторе МНЛЗ на процессы формирования
круглых заготовок и их структуру 3

**Смирнов А.Н., Гридин С.В., Белобров Ю.Н.,
Цупрун А.Ю., Сусь Ю.В., Пильгаев В.М.**
Математическое моделирование процессов загиба и разгиба
непрерывнолитой заготовки 8

ОБОРУДОВАНИЕ

Сидоров В.А., Нестеров А.Л.
Исследование влияния давления воздуха
в пневмоамортизаторах механизма качания
на параметры движения кристаллизатора МНЛЗ 14

**Еронько С.П., Ошовская Е.В.,
Штепан Е.В., Мечик С.В., Бедарев С.А.**
Опыт и перспективы физического моделирования
гидродинамики потоков металла
в ванне промежуточного ковша МНЛЗ 20

Смирнов А.Н., Антыкуз О.В., Цупрун А.Ю.
Достоинства и возможности
механизма качания кристаллизатора МНЛЗ
с гидравлическим приводом 33

ТЕХНИЧЕСКИЙ МЕНЕДЖМЕНТ

Сидоров В.А., Сотников А.Л., Птуха С.В.
Техническое обслуживание и ремонт
механизма качания кристаллизатора МНЛЗ 39

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ

25. Устройство для обработки наружных поверхностей вращения
крупногабаритных изделий с незакрепленной осью вращения,
без демонтажа технологического оборудования 45

26. Технология восстановления поверхностей
медьсодержащих изделий
на основе управляемого электрохимического процесса
путем осаждения или наращивания микрогетерогенного слоя
определенного состава с заданными свойствами 46

27. Электромагнитный процесс изготовления двухслойной стали 47
Условия публикации технологических предложений 49

ИНФОРМАЦИЯ

Бланк заказа научно-технической литературы 50

Требования к статьям, направляемым в редакцию 59

Об издании 60

УДК 621.746

А.Н. Смирнов /д.т.н./

НПО "Доникс" (Донецк, Украина)

С.В. Гридин /к.т.н./

Донецкий национальный технический университет (Донецк, Украина)

Ю.Н. Белобров /к.т.н./

ЗАО "Новокраматорский машиностроительный завод" (Краматорск, Украина)

А.Ю. Цупрун

НПО "Доникс" (Донецк, Украина)

Ю.В. Сусь, В.М. Пильгаев

ЗАО "Новокраматорский машиностроительный завод" (Краматорск, Украина)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАГИБА И РАЗГИБА НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

Розглянуто особливості умов поводження твердої скоринки безупиннолітої заготовки в умовах її загну та розгну. Запропоновано математичні моделі і алгоритм розрахунку, що дозволяють оптимізувати напружений стан заготовки і оптимізувати геометричне положення технологічної осі МНЛЗ.

Рассмотрены особенности условий поведения твердой корочки непрерывнолитой заготовки в условиях ее загиба и разгиба. Предложены математические модели и алгоритм расчёта, позволяющие оптимизировать напряжённое состояние заготовки и оптимизировать геометрическое положение технологической оси МНЛЗ.

В последнее десятилетие произошло резкое изменение представлений о современной слябовой машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Это привело к тому, что большинство машин в странах Европы, Японии и США подвергаются серьезной реконструкции и модернизации [1]. Новые же МНЛЗ имеют производительность в 1,5...1,8 раза выше, чем аналогичные МНЛЗ, сооруженные 10 и более лет назад. Это позволяет им выглядеть наиболее конкурентоспособными на рынке металлургического оборудования.

Одним из направлений развития слябовых МНЛЗ является удовлетворение возрастающих требований к качеству продукции. Для этих целей на практике все чаще применяют усовершенствованные прямолинейные кристаллизаторы. Кристаллизаторы такой конструкции могут также быть использованы и на уже работающих машинах после соответствующей реконструкции.

В настоящее время для новых слябовых МНЛЗ ("средний" и "толстый" сляб 180...300 мм) можно выделить следующие основные тенденции их конструктивного оформления:

– применение вертикального кристаллизатора длиной 0,8...1 м (в зависимости от сечения

заготовки) с возможностью изменения ширины сляба в процессе разлива;

– наличие вертикального участка под кристаллизатором длиной 1,5...1,7 м и более;

– наличие многоточечной секции разгиба заготовки;

– уменьшение базового радиуса до 7...8 м;

– наличие зоны многоточечного разгиба заготовки (4...5 точек и более);

– наличие зоны "мягкого" обжатия, обеспечивающей повышение качества внутренней зоны заготовки.

Как показывает анализ, следует различать два концептуальных построения, которые наблюдаются на современных МНЛЗ. Первое построение заключается в создании новой МНЛЗ без жесткой привязки к старому оборудованию (например, новые МНЛЗ кислородно-конвертерного цеха 1 ОАО "Новолипецкий металлургический комбинат" (Липецк, Россия)). Второе построение характеризуется реконструкцией уже имеющейся радиальной МНЛЗ, что предусматривает максимальное "вписывание" в уже имеющиеся параметры (например, МНЛЗ "Sollac Atlantique" (Франция)). Безусловно, второе построение имеет специфические особенности и не может быть использовано для определения базово-

вых параметров современной МНЛЗ. В любом случае построение технологической оси МНЛЗ и, соответственно, расчет оптимальных параметров зоны загиба и разгиба заготовки представляется ключевым моментом построения современной МНЛЗ.

Известно, что загиб и разгиб непрерывнолитой заготовки происходит в интервале между температурой солидус и температурой горячей прокатки. В этом диапазоне пластические свойства стали значительно колеблются. Вследствие того, что непрерывнолитая заготовка одновременно затвердевает и движется сквозь рабочее пространство МНЛЗ, существует высокая вероятность формирования несплошностей по причине растягивающих деформаций вблизи межфазной поверхности между оболочкой (корочкой) и жидкой сердцевиной литой заготовки.

Некоторые исследователи придерживаются той точки зрения, что поскольку дендриты у межфазной поверхности затвердевания действуют нежелательным образом только в условиях растягивающих деформаций, то непрерывнолитая заготовка может рассматриваться в качестве "датчика растягивающих деформаций", т.е. она чувствительна к любому виду растягивающей деформации. Обычно в качестве индикатора несплошностей, вызванных растягивающей деформацией, принимаются так называемые "ликвационные полоски", которые наблюдаются в виде потемнений на макротравленных сечениях литого и прокатанного непрерывнолитого изделия.

Принято считать, что "ликвационные полоски" являются результатом разрушения границ зерен во время затвердевания, ориентированных перпендикулярно к приложенным растягивающим напряжениям. Вследствие низкой пластичности стали при температуре вблизи солидуса, граница зерна вблизи межфазной поверхности затвердевания может разрушиться, когда напряжения превзойдут некоторое пороговое значение. Междендритная жидкость, обогащенная ликвирующими элементами и фазами (особенно фосфором и сульфидами), из прилегающей лунки затем втягивается и накапливается в зоне разрушения. Пороговый уровень формирования "ликвационных полосок" сильно зависит от содержания углерода в стали. Общепринятые "безопасные" уровни деформаций и те, которые часто цитируются в литературе, составляют 1,25 % для поверхностной деформации и 0,2...0,25 % для межфазной деформации. По данным работ [2,3] предельное относительное удлинение при температурах 1470...1430 °С составляет 0,3...0,4 %.

Рассматривая динамику формирования твердой фазы при затвердевании непрерывнолитой

заготовки необходимо отметить, что в области температуры солидус (фронт затвердевания) металл находится как в твердом (дендриты), так и в жидком (междендритное пространство) состоянии. Только на некотором расстоянии от фронта затвердевания появляются слои металла, имеющие целиком твердую фазу. Между тем эти слои металла находятся в напряженном состоянии, обусловленном перепадом температур между наружной поверхностью заготовки и фронтом затвердевания. Следовательно, в расчетах допустимых радиусов загиба и разгиба заготовки с жидкой сердцевиной следует принимать во внимание допустимые относительные удлинения не на границе фронта затвердевания, а на некотором удалении от него (13...15 мм).

Определению коэффициента относительного удлинения стали в области температур затвердевания посвящено достаточно большое количество работ [4...8]. В целом приведенные данные свидетельствуют о том, что пластичность стали в диапазоне температур 1300...1400 °С значительно ниже 1 %. Колебания значений пластичности стали обусловлены, главным образом, различием методик исследований (способ получения образцов, скорость деформации, размеры образцов, метод замера температуры образца, содержание углерода в стали и пр.). Следовательно, известные литературные данные относительно пластичности стали могут быть использованы только с учетом того, что они носят достаточно приблизительный характер.

Широкий анализ условий образования внутренних трещин выполнен в работах [7,8]. Склонность к образованию трещин зависит от соотношения деформационной способности и прочностных свойств затвердевающей стали. Критические значения относительного удлинения могут колебаться в значительных пределах в зависимости от содержания углерода, марганца, серы, фосфора и пр. Вместе с тем для оценочных расчетов критические значения коэффициента относительного удлинения могут находиться в пределах 0,2...0,25 %. Критическая скорость деформации при этом находится в пределах $10^{-2}...10^{-4} \text{ с}^{-1}$, а предел прочности твердой корочки составляет 10...20 МПа (для ряда сталей порядка 4...6 МПа).

Более точные оценки напряженного состояния непрерывнолитой заготовки в процессе ее формирования и деформации могут быть выполнены с помощью методов расчета аккумулярованных напряжений [9]. Предполагается, что для предупреждения нарушения сплошности металла необходимо, чтобы вследствие усадки стали, температурных напряжений, механических (ли-

тейных) деформаций и ферростатического давления суммарные напряжения, деформационная способность и скорость деформации не превышала их критических значений, при которых наступает разрушение металла. По данным работы [9] для углеродистых сталей допускаемые суммарные критические значения растяжения заготовки (разгиб-загиб, термические, напряжения затвердевания) не должны превышать 0,7 %. Приведенные рекомендации подтверждены на практике.

С учетом вышеизложенного авторами разработана оригинальная методика моделирования напряженного состояния непрерывнолитой заготовки и расчета оптимальной технологической оси МНЛЗ в зависимости от условий разлива, сечения заготовки, марки стали и т.п.

Для теплофизических расчетов процессов, сопровождающих затвердевание непрерывнолитой заготовки, разработана динамическая математическая модель, реализованная в виде программного комплекса "Machine", позволяющая получать следующие параметры:

- поле температур (температура в каждой точке заготовки);
- тепловой поток с поверхности заготовки в любой момент времени;
- поле распределения твердой фазы (процентное содержание твердой фазы в каждой точке заготовки);
- толщина твердой корочки в каждом сечении заготовки;
- ширина жидкой лунки в каждом сечении заготовки;
- ширина двухфазной (твёрдо-жидкой) области в каждом сечении заготовки;
- глубина жидкой лунки.

Вывод полученных в ходе расчетов результатов может осуществляться следующими способами:

- текстовые сообщения – значения температуры и параметров кинетики затвердевания для текущего момента времени и в контрольных точках (выход из кристаллизатора, зона вторичного охлаждения, зона резки);
- цветовые диаграммы распределения температуры и доли твердой фазы в продольном (осевом) и поперечном сечениях непрерывнолитой заготовки;
- графики распределения исследуемых параметров (температуры, теплового потока, ширины жидкой лунки, толщина твердой корочки, напряженное состояние и относительные деформации твёрдого каркаса) в продольном и поперечном направлениях;
- таблицы, которые дублируют информацию,

представленную на графиках.

Программный комплекс "Machine" позволяет варьировать многие технологические параметры процесса непрерывной разлива стали на МНЛЗ и исследовать, как влияют выбранные значения на распределение температуры и формирование структуры заготовки.

Для выполнения проектного расчета технологическая ось слябовой МНЛЗ разбивается на следующие участки (рисунок 1): вертикальный кристаллизатор, вертикальный участок под кристаллизатором, участок многоточечного загиба, радиальный участок, участок многоточечного разгиба, горизонтальный участок.

Начальным этапом проектирования является решение проблемы выбора базового радиуса машины R_0 , т.е. радиуса, по которому описана задняя стенка технологического канала машины, включая кристаллизатор и дуговой участок зоны вторичного охлаждения. При перестройке машины на другую толщину заготовки ее базовый радиус остается неизменным. Базовый радиус является одним из основных конструктивных параметров МНЛЗ. Минимальный базовый радиус обычно ограничивается допустимой деформацией заготовки при ее правке. Кроме того, с уменьшением радиуса кристаллизатора возрастает вероятность образования точечной ликвации вблизи поверхности формирующейся в кристаллизаторе заготовки. Излишнее увеличение базового радиуса влечет за собой повышение высоты и массы машины. При этом также возрастает давление столба жидкого металла на оболочку заготовки и на поддерживающие ролики, что способствует появлению внутренних дефектов в заготовке.

На основании теоретического анализа и опыта эксплуатации многих МНЛЗ криволинейного типа выработаны рекомендации по ограничению базовых радиусов машин в пределах 25...35-кратной толщины отливаемых заготовок [3,10]. Следует иметь в виду, что эти значения могут быть скорректированы применительно к конкретным условиям разлива.

Расчет полной длины участка загиба $L_{заг}$ проводится по оригинальной методике, разработанной авторами. Согласно ей полную длину участка загиба можно определить, зная число точек загиба и шаг гибочных роликов на криволинейном участке загиба. Кроме того, загиб заготовки должен выполняться таким образом, чтобы обеспечить минимальную деформацию наружных или внутренних слоев заготовки на каждом отрезке ее пути. Наименьшая скорость деформации наружных слоев заготовки может быть получена в том случае, если деформация будет

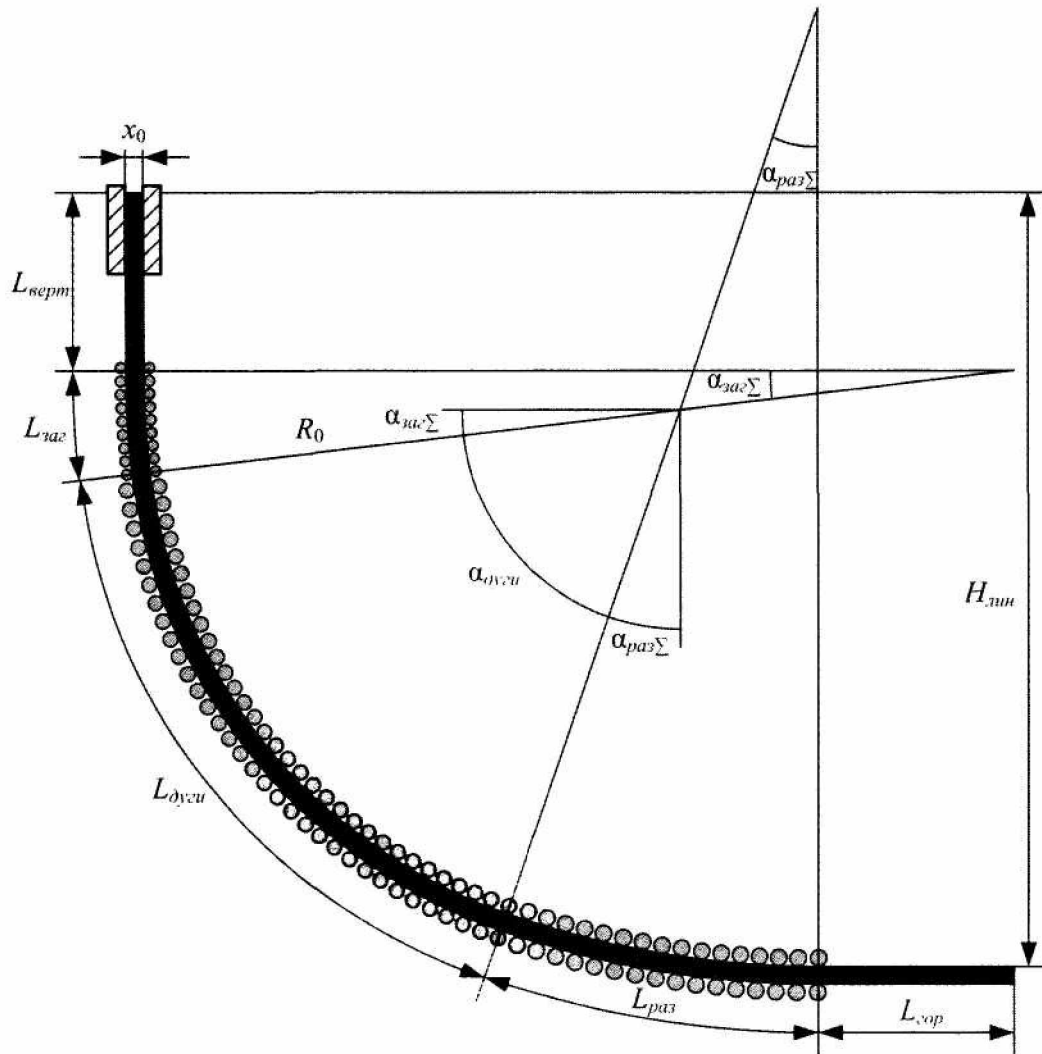


Рисунок 1 – Схема МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным кристаллизатором:
 x_0 – толщина сляба; R_0 – базовый радиус; $H_{тех}$ – высота технологической оси;
 $L_{верт}$ и $L_{гор}$ – длина, соответственно, вертикального и горизонтального участка технологической оси; $L_{ради}$ – длина дуги радиального участка технологической оси;
 $L_{заг}$ и $L_{раз}$ – длина кривой участка, соответственно, загиба и разгиба заготовки;
 $\alpha_{заг}$ и $\alpha_{раз}$ – полный угол, соответственно, загиба и разгиба заготовки;
 $\alpha_{ради}$ – полный угол дуги радиального участка технологической оси

равномерно распределена по всей длине участка загиба. Т.е. основным фактором, определяющим длину участка многоточечного загиба при известном шаге, является условие непревышения величины относительной деформации загиба на каждом из роликов загиба $\epsilon_{заг,i}$ критических значений показателя пластичности стали $\epsilon_{дон}$.

Участок загиба может быть построен по кривой с постоянно уменьшающимся радиусом кривизны от бесконечности в начале загиба при переходе с вертикального участка на криволинейный до величины базового радиуса R_0 при переходе с участка загиба на радиальный участок, т.е. в последней точке загиба радиус угла загиба $R_{заг,n} = R_0$. Исходя из этого, накопившаяся полная относительная деформация на всем участке загиба определяется из выражения:

$$\epsilon_{заг} = \frac{x_0}{2 \cdot \left(R_0 - \frac{x_0}{2} \right)}, \quad (1)$$

где x_0 – толщина сляба.

Тогда общее число точек загиба будет равно:

$$n_{заг} = \frac{\epsilon_{заг}}{\epsilon_{дон}} + 1.$$

Относительная деформация загиба на каждом из роликов $\epsilon_{заг,i}$ определяется как отношение полной относительной деформации загиба на всем участке $\epsilon_{заг}$ к общему числу точек загиба $n_{заг}$.

Радиус кривизны кривой загиба на каждом из

роликов $R_{заг.i}$ определяется согласно выражению (1), если базовый радиус R_0 заменить значением текущего радиуса $R_{заг.i}$, а поскольку накопившаяся полная относительная деформация на всем участке загиба равна сумме относительных деформаций загиба $\epsilon_{заг.i}$ на каждом из роликов загиба: $\epsilon_{заг.\Sigma} = \sum \epsilon_{заг.i} = n_{заг} \cdot \epsilon_{заг.n_{заг}}$, суммарная относительная деформация загиба, накопившаяся к моменту достижения рассматриваемым сечением заготовки i -го ролика загиба, равна $\sum \epsilon_{заг.i} = i \cdot \epsilon_{заг.i}$. Тогда после проведения соответствующих замен и преобразований в формуле (1) выражение для радиуса $R_{заг.i}$ на каждом i -м ролике имеет вид:

$$R_{заг.i} = \frac{x_0}{2} + \frac{x_0}{2 \cdot i \cdot \epsilon_{заг.i}}, \quad i=1, 2, \dots, n_{заг}.$$

Участок разгиба (распрямления) заготовки, в отличие от участка загиба, должен быть построен по кривой с постоянно увеличивающимся радиусом кривизны от величины базового радиуса R_0 при переходе с дугового участка на участок разгиба до бесконечности в конце разгиба при переходе с криволинейного участка на горизонтальный. Исходя из этого, суммарная полная относительная деформация на всем участке разгиба $\epsilon_{раз.\Sigma}$ определяется из выражения

$$\epsilon_{раз.\Sigma} = \frac{x_0}{R_0 - x_0}.$$

Общее число точек разгиба $n_{раз}$ определяется как:

$$n_{раз} = \frac{\epsilon_{раз.\Sigma}}{\epsilon_{дон}} + 1.$$

Радиус кривизны кривой разгиба на каждом из роликов правки $R_{раз.i}$ определяется согласно выражению

$$R_{раз.i} = \frac{x_0}{(n_{раз} - (i - 1)) \cdot \epsilon_{раз.i}} + x_0, \quad i=1, 2, \dots, n_{раз},$$

если базовый радиус R_0 заменить значением текущего радиуса $R_{раз.i}$, а так как полная относительная деформация на всем участке разгиба равна $\epsilon_{раз.\Sigma} = \sum \epsilon_{раз.i} = n_{раз} \cdot \epsilon_{раз.n_{раз}}$, то суммарная относительная деформация разгиба, накопившаяся к моменту достижения рассматриваемым сечением заготовки i -го ролика разгиба, будет равна $\sum \epsilon_{раз.i} = i \cdot \epsilon_{раз.i}$.

Тестовые расчеты, выполненные авторами по данной методике для слябов толщиной $x_0 = 160 \dots 300$ мм и скорости вытягивания заготовки $0,7 \dots 2,4$ м/мин, хорошо согласуются с известными по литературе данными относительно построения технологических осей современных слябовых МНЛЗ [10].

Так, в ходе проверочного расчета рассчитанные параметры слябовой МНЛЗ сравнивались с данными по слябовой 2-х ручьевой криволинейной МНЛЗ с базовым радиусом 8 м, вертикальным кристаллизатором и многоточечным прогрессирующим загибом-разгибом заготовки, реконструированной фирмой "Siemens VAI Metals Technologies GmbH & Co" (Австрия) в 1998 г. на заводе "Sollac Atlantique" (таблица 1). Диапазон сечений слябов, разливаемых на данной МНЛЗ, – от 222×1050 мм до 240×2200 мм.

Сравнивались данные по радиусам точек разгиба, определяющихся как точка контакта поверхности гибочного ролика с поверхностью заготовки. Сравнение расчетных данных по гибочным роликам участка разгиба для слябов сечений 222×1050 мм и 240×2200 мм с данными по радиусам гибочных роликов МНЛЗ конструкции фирмы "Siemens VAI Metals Technologies GmbH & Co" (таблица 1) показало их совпадение с точностью до $0,67\%$ и $0,91\%$ для слябов сечением, соответственно 222×1050 мм и 240×2200 мм.

Наилучшее совпадение по радиусам точек разгиба для слябов сечением 222×1050 мм достигалось при значениях критической относительной деформации в пределах $0,1842 \leq \epsilon_{дон} \leq 0,1968$, а для слябов сечением 240×2200 мм – в пределах $0,19954 \leq \epsilon_{дон} \leq 0,2132$.

Таким образом, разработанная методика представляют собой замкнутую систему уравнений, решение которой позволяет на этапе выполнения технического и рабочего проектов рас-

Таблица 3 – Сравнение результатов расчета с данными "Sollac Atlantique"

| Базовый радиус, м | Номер точки разгиба | Радиусы точек разгиба для сечений заготовки, м | | |
|-------------------|---------------------|--|----------------------|---|
| | | Результаты расчета в программном комплексе "Machine" | | Данные "Sollac Atlantique" |
| | | 222×1050 мм | 240×2200 мм | |
| 8 | 1 | 8 | 8 | от 222×1050 мм до 240×2200 мм |
| | 2 | 12,537 | 12,527 | 12,5 |
| | 3 | 16,642 | 16,622 | 16,5 |
| | 4 | 24,852 | 24,813 | 24,9 |
| | 5 | 49,483 | 49,387 | 49,9 |

считать на современном уровне следующие параметры МНЛЗ:

– положение технологической оси МНЛЗ (размеры вертикального участка и кристаллизатора, закон и длину участков загиба и разгиба, базовый радиус и длину радиального участка, длину горизонтального участка, металлургическую длину в целом, длину жидкой фазы для каждого сечения заготовки и каждой марки стали);

– скорость вытягивания заготовки (предельно допустимую и номинальную);

– шаг и диаметры роликов зоны вторичного охлаждения с разбивкой их на сегменты.

В целом разработанные и адаптированные непосредственно авторами математические модели, алгоритм расчёта процесса затвердевания непрерывнолитой заготовки в поле реальных значений технологических параметров разлива и программный комплекс "Machine" не используют данные других разработчиков. Кроме того, предусмотрено использование открытой для дополнения базы данных по различным маркам стали, содержащей справочные данные, необходимые для выполнения расчёта, с указанием их величин и источников получения.

Выводы

1. Предложена научно-обоснованная и практически адаптированная методика расчета профиля технологической оси слябовой МНЛЗ, основанная на итерационной процедуре расчета траектории движения заготовки, обеспечивающей постоянство деформации на фронте кристаллизации для каждого шага правки. Использование программного комплекса "Machine", разработанного на базе данной методики, дает возможность создания конкурентоспособных конструкций высокопроизводительных МНЛЗ, обеспечивающих требуемое качество получаемой металлопродукции.

2. Определены координаты центров роликов вдоль технологической оси криволинейной МНЛЗ с прямым вертикальным кристаллизатором с возможностью последующего варьирования условий компоновки роликов в сегменты. Показана практически полная сходимость полученных результатов расчетов с известными промышленными аналогами фирмы "Siemens VAI Metals Technologies GmbH & Co".

3. Проведено численное исследование термических напряжений и относительных деформаций в системе слиток-кристаллизатор-зона вторичного охлаждения, исходя из условий минимизации суммарных деформаций на фронте кристаллизации. Полученные результаты анализа использованы при решении практических задач по оптимизации работы действующих МНЛЗ.

1. *Смирнов А.Н.* Тенденции развития технологической непрерывной разливки стали и конструкций МНЛЗ / Национальная металлургия. – 2002. – №3. – С. 33-37.
2. *Непрерывная разливка стали на радиальных установках* / В.Т. Сладкошteeв, Р.В. Потанин, О.Н. Суладзе и др. – М.: Металлургия, 1974. – 288 с.
3. *Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д.* Машины непрерывного литья слябовых заготовок. – М.: Металлургия, 1991. – 272 с.
4. *Непрерывная разливка стали в сортовые заготовки* / В.С. Рутес, Н.Н. Гуглин, Д.П. Евтеев и др. – М.: Металлургия, 1967. – 144 с.
5. *Van Drunen G., Brimacombe J.K., Weinberg F.* Internal cracks in strand-cast billets / Ironmaking and Steelmaking. – 1975. – No.10. – P. 125-133.
6. *Lankford W.T.* Some Considerations of Strength and Ductility in the Continuous-Casting Process / Metallurgical Transactions. – 1972. – Vol.3, June. – P. 1331-1359.
7. *Florckhak J.V.* Straight-v.curved-mould continuous casters for slab production / Ironmaking and Steelmaking. – 1979. – V.6. No.3. – P. 123-130.
8. *Hiebler H., Zirngast J., Bernhard Ch.* Inner crack formation in continuous casting: strain or criterion? 77-th Steelmaking conference proceedings. Chicago Meeting. – 1994. – Vol. 77. – P. 405-412.
9. *New design to prevent internal cracking in continuous casting* / Yamanaka A., Okamura K., Kumakura S. e.a. // 3rd European Conf. on Continuous Casting, Madrid-Spain, October 20-23, 1998. – P. 415-424.
10. *World Survey: Continuous Casting Machines for Steel.* – Zurich: Concast Standard, 2000. – 201 p.

Статья поступила 17.11.2009 г.

© А.Н. Смирнов, С.В. Гридин, Ю.Н. Белобров, А.Ю. Цупрун, Ю.В. Сусь, В.М. Пильгаев, 2009

Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько