*Продолжение табл. 3*

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | DC04 (типа 08пс); $b$ = 1510; $h$ = 0,769 | 1 | 0,327 | 6,4 | 2,8 | 5,31 | 1437 | 0,013 | 0,132 |
| | | 2 | | 7,8 | | 4,85 | 1338 | 0,013 | 0,131 |
| | | 3 | | 6,9 | | 4,64 | 1278 | 0,013 | 0,138 |
| | | 4 | | 4,4 | | 4,47 | 1230 | 0,013 | 0,146 |
| | | 5 | | 2,7 | | 4,80 | 1322 | 0,013 | 0,154 |
| 4 | 08пс; $b$ = 1250; $h$ = 0,520 | 1 | 0,327 | 9,3 | 2,8 | 4,31 | 1185 | 0,013 | 0,113 |
| | | 2 | | 8,8 | | 4,12 | 1137 | 0,013 | 0,120 |
| | | 3 | | 5,7 | | 4,00 | 1104 | 0,014 | 0,113 |
| | | 4 | | 4,8 | | 4,01 | 1105 | 0,013 | 0,114 |
| | | 5 | | 4,6 | | 2,99 | 824 | 0,016 | 0,128 |

8. Определение нормального напряжения в межвалковом контакте по формуле Беляева – Герца:

$$p_0 = \frac{2P}{\pi b \left(L_{\text{оп}} - 2c\right)},$$

9. Расчет инерционного момента опорного валка $M_{\text{ин. оп}}$:

$$M_{\text{ин. оп}} = m\frac{D^2}{8}\varepsilon = \frac{\pi}{32} L \gamma D^4 \varepsilon,$$

где $m$ – масса; $D$ – наружный диаметр; $L$ – длина бочки; $\gamma$ – плотность материала; $\varepsilon$ – угловое ускорение.

10. Расчет тангенса угла наклона межвалкового усилия tgβ к плоскости, проходящей через оси этих валков, по формуле (4).

Результаты вычислений энергосиловых и геометрических характеристик (см. пп. 3 – 9) для каждого режима прокатки приведены в табл. 3.

11. Определение коэффициента трения покоя в межвалковом контакте клети «кварто» по регрессионной зависимости (2). Результаты вычислений приведены в табл. 3.

12. Проверка выполнения условия отсутствия вероятности возникновения пробуксовки (3).

13. Если условие (3) не выполняется хотя бы для одной клети, то необходимо скорректировать энергосиловые параметры работы стана путем перераспределения обжатий и по клетям (увеличить обжатие в клети, где возникла опасность пробуксовки).

После корректировки режима прокатки необходимо проверить для каждой клети стана соблюдение условия, исключающего возникновение пробуксовки (3), то есть провести повторный расчет с пункта 2 по пункт 12.

Управление режимом прокатки на стане по разработанной методике должно производиться автоматически.

Таким образом, разработан способ прокатки на широкополосном стане, оснащенном клетями «кварто» с приводом через рабочие валки, исключающий опасность возникновения пробуксовки [5].

Литература

1. *Андреев, А.В.* Передача трением / А.В. Андреев. – М., 1978.

2. *Гарбер, Э.А.* Расчет энергосиловых параметров широкополосных станов холодной прокатки / Э.А. Гарбер // Сталь. – 1998. – № 9. – С. 37 – 41.

3. *Ермилов, В.В.* Проблема трения первого рода в межвалковом контакте многовалковых клетей станов холодной прокатки / В.В. Ермилов // Вестник ЧГУ. – 2011. – № 1 (28). – С. 79 – 81.

4. *Крагельский, И.В.* Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М., 1977.

5. Пат. 2210442 Российская Федерация, С 2, 7 В 21 В 1/28. Способ холодной прокатки полосы на стане с четырехвалковыми клетями с приводом через рабочие валки / Гарбер Э.А., Горшков И.К., Ермилов В.В.; № 2001128270; заявл. 18.10.01; опубл. 20.08.03, Бюл. № 52.

УДК 669.02/09

***Н.В. Телин, Н.Н. Синицын***

## АЛГОРИТМ ПОЭТАПНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННО-СКОРОСТНОГО РЕЖИМА РАЗЛИВКИ

Предложены прямой и обратный алгоритмы поэтапного моделирования температурно-деформационно-скоростного режима разливки стали на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с выделением трех зон формирования слитка.

Моделирование режима разливки производится на основе последовательного использования математических моделей, сначала отдельно для зоны кристаллизатора, зоны вторичного охлаждения и зоны обжатия, а затем в целом для всей линии разливки.

При практической реализации метода могут применяться как одномерные, так и многомерные модели.

Алгоритм, метод, модель, зона, кристаллизатор, режим, обжатие, слиток, ролики.

The article considers the direct and return algorithm of stage-by-stage modeling of temperature-deformation-speed conditions of casting of steel at continuous casting machines (CCM) with allocation of three zones of ingot formation.

Modeling of casting of steel is made on the basis of consecutive use of mathematical models, at first separately for the zone of a crystallizer, the zone of secondary cooling and the zone of cogging, and then in whole for all line casting.

At practical realization of the method both one-dimensional and multidimensional models can be applied.

Algorithm, method, model, zone, crystallizer, mode, cogging, an ingot, rollers.

Обработка металла в непрерывных металлургических машинах состоит из однотипных операций: прохождение металла между роликами или валками, а затем движение металла до следующей пары роликов или валков и так до конца технологической линии. Однотипность технологических операций и условий взаимодействия роликов и валков с обрабатываемым металлом позволяет выделить ограниченное число математических моделей температурно-деформационно-скоростных режимов обработки металла, охватывающих разнообразные металлургические машины. При этом задача моделирования температурно-деформационно-скоростных режимов должна включать в себя моделирование как всего технологического процесса, так и отдельных его зон и элементов. В дальнейшем, с целью конкретизации, вопросы моделирования обработки металла в металлургических машинах рассматриваются в основном на примере технологии обжатия непрерывно отливаемого слитка с жидкой сердцевиной.

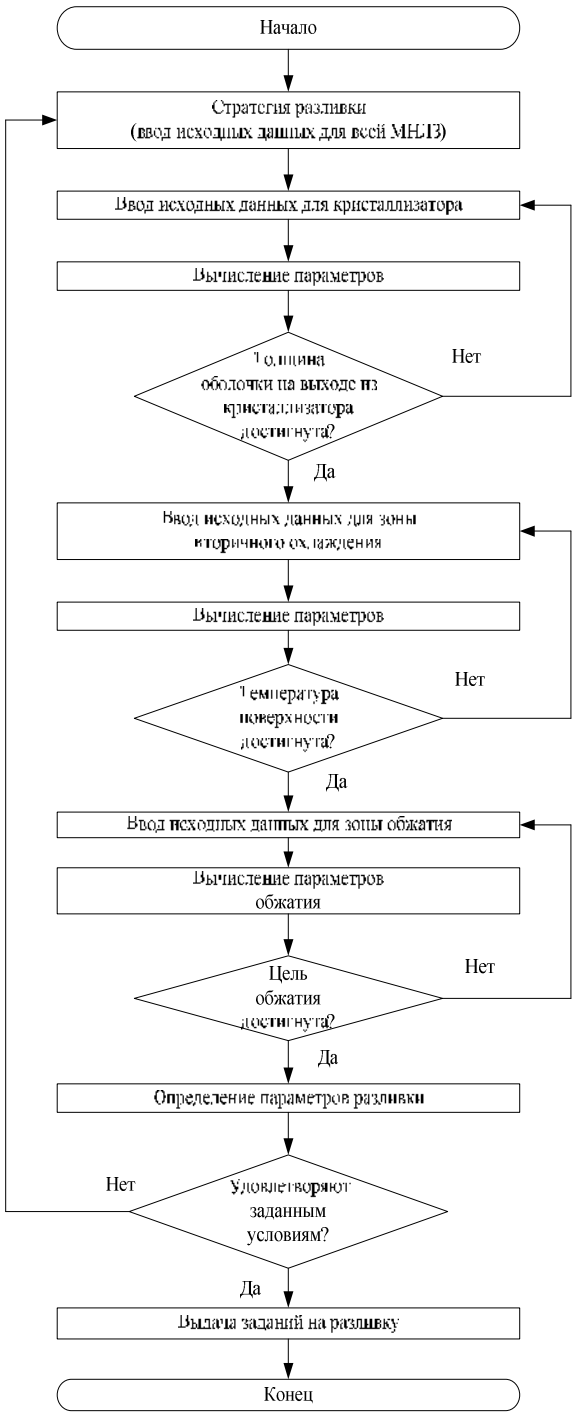
Основным недостатком существующего программного обеспечения моделирования процесса разливки является то, что он не позволяет использовать опыт разных поколений конструкторов и технологов по учету особенностей формирования слитка в кристаллизаторе; в зоне вторичного охлаждения и тем самым обеспечивать выпуск высококачественного металла и эффективность работы МНЛЗ. Создание адекватной математической модели, охватывающей всю совокупность явлений, происходящих в формирующемся слитке, весьма затруднительно. Поэтому при разработке математической модели процесса непрерывной разливки с применением обжатия наиболее разумно выделить не две, как обычно, а три зоны формирования слитка, существенно отличающиеся по теплофизическим и физико-химическим условиям затвердевания: зону кристаллизатора, зону вторичного охлаждения и зону обжатия. В этом случае линия разливки разбивается вдоль технологической оси по направлению вытягивания слитка на три зоны: зону кристаллизатора, зону вторичного охлаждения и зону обжатия. В зоне кристаллизатора формируется поперечное сечение слитка. Толщина оболочки слитка на выходе из кристаллизатора должна исключать прорыв жидкого металла. В зоне вторичного охлаждения формируется основное по поперечному сечению тело слитка. В зоне обжатия для повышения качества металла в осевой части предусматривается деформация двухфазной зоны. Системы охлаждения во всех трех зонах должны обеспечивать необходимый закон продвижения двухфазной зоны, тепловое состояние роликов с учетом скорости вытягивания слитка. Разливка начинается в момент заполнения кристаллизатора жидким металлом и заканчивается в момент прохождения концевой части слитка горизонтального участка.

Для моделирования температурно-деформационно-скоростного режима разливки применяется поэтапный метод моделирования. При поэтапном методе моделирование температурно-деформационно-скоростного режима разливки производится на основе последовательного использования математических моделей, сначала отдельно для зоны кристаллизатора, зоны вторичного охлаждения и зоны обжатия, а затем в целом для всей линии разливки. На любом из уровней иерархии задачей анализа является определение тех характеристик температурных полей, толщины оболочки слитка, скорости разливки, которые необходимы для нахождения конструктивных и технологических параметров МНЛЗ, соответствующих этому уровню (например, температура поверхности, толщина оболочки слитка, время разливки в любой зоне и т.д.). Таким образом, моделирование температурно-деформационно-скоростного режима разливки проводится в два этапа с проходом от нижнего уровня иерархии, включающего в себя зону кристаллизатора, зону вторичного охлаждения и зону обжатия, к верхнему уровню, включающему в себя всю линию разливки.

На первом этапе моделирования с максимально допустимой степенью детализации последовательно с момента заполнения кристаллизатора металлом рассматриваются температурные поля в слитке и элементах оборудования, рост толщины оболочки слитка, изменение ширины двухфазной зоны, потоки теплоносителя. На втором этапе проводится согласование параметров разливки по всем зонам, анализируются температурные, энергетические и временные показатели работы всей МНЛЗ. В зависимости от поставленной задачи возможно моделирование температурно-деформационно-скоростного режима разливки и в обратном направлении. При практической реализации этих этапов могут применяться как одномерные, так и многомерные модели [1], [2].

На рисунке приведен алгоритм расчета температурно-деформационно-скоростного режима разливки с применением обжатия слитка с жидкой сердцевиной. В качестве исходных данных для всей МНЛЗ являются: химический состав стали, геометрические размеры сляба и производительность МНЛЗ.

Для кристаллизатора предусмотрено задание следующих параметров: температуры жидкой стали, скорости разливки, конструктивного решения кристаллизатора. Математическая модель предполагает определение следующих параметров: геометрических размеров и шага водоохлаждаемых каналов, высоты кристаллизатора.




Алгоритм расчета режима разливки
с применением обжатия слитка
с жидкой сердцевиной

Для зоны вторичного охлаждения в качестве исходных данных предусмотрено задание следующих параметров: поперечного сечения слитка, температуры поверхности и скорости вытягивания. Математическая модель зоны вторичного охлаждения предполагает определение следующих параметров:

– площади орошения поверхности слитка по широким и узким граням;

– значения коэффициента теплоотдачи по поверхности слитка, обеспечивающего соблюдение заданного (желательного) графика изменения температуры поверхности слитка;

– средних значений коэффициентов теплоотдачи в каждой из секций зоны вторичного охлаждения;

– средние значения плотности орошения (удельного расхода воды) в каждой из секций.

Для зоны обжатия предусмотрено задание следующих параметров: толщины оболочки слитка, ширины двухфазной зоны и конструктивного решения роликов обжимающих секций. Математическая модель зоны обжатия предполагает определение следующих параметров: распределения примеси по сечению слитка; обжатия, необходимого для подавления пористости в осевой части слитка, и теплового состояния обжимающих роликов.

Для действующей МНЛЗ найденные режимные параметры разливки передаются в систему автоматического регулирования технологических параметров.

Изложенная общая схема метода поэтапного моделирования температурно-деформационно-скоростного режима разливки представляется ясной и логично вытекающей из общих принципов системного анализа и математической теории сложных систем, рассматривающих процедуры агрегирования и декомпозиции.

При агрегировании производится укрупнение исходной полной математической модели для расчета осредненных характеристик. Процедура декомпозиции связана с выделением группы компонентов из системы и составлением модели для более детального анализа.

Изложенный алгоритм реализован для определения параметров «мягкого обжатия» слитка с жидкой сердцевиной при непрерывной разливке стали на слябовой МНЛЗ.

Предложенный в данной работе метод поэтапного моделирования применим также и для анализа температурно-деформационно-скоростного режима прокатки листа на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки.

Литература

1. *Телин, Н.В.* Тепло- и массоперенос в зоне плавающих кристаллов / Н.В. Телин // Вестник ЧГУ. Естественные и технические науки. – 2011. – № 1. – С. 101 – 104.

2. *Телин, Н.В.* Расчет теплового состояния роликов металлургических машин в трехмерной постановке / Н.В. Телин, М.С. Голубев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 3. – С. 68.